



LAPORAN TESIS  
TK 142541

**PENGOLAHAN LIMBAH LOGAM Cr SEBAGAI  
PENGHASIL BIO-LISTRIK DENGAN  
MENGUNAKAN REAKTOR *MICROBIAL  
FUEL CELL***

PRAPTI IRA KUMALASARI  
2315 201 006

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNOLOGI PROSES  
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

**LEMBAR PENGESAHAN TESIS**  
**PENGOLAHAN LIMBAH LOGAM Cr SEBAGAI PENGHASIL**  
**BIO-LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN REAKTOR**  
**MICROBIAL FUEL CELL**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

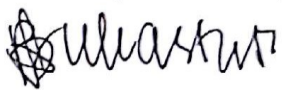
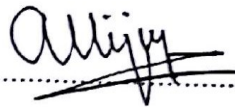

Prapti Ira Kumalasari

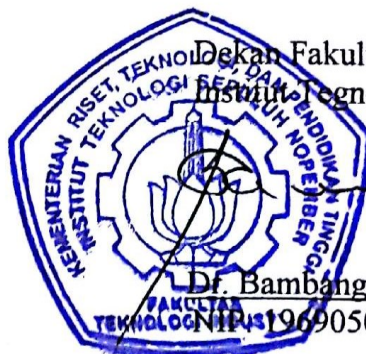
Nrp. 2315201006

Tanggal Ujian : 20 Juli 2017


Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh :

- |  |              |  |
|--|--------------|--|
| 1. Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng<br>NIP. 19590730 1986 03 2001 | (Pembimbing) | <br>..... |
| 2. Prof. Dr. Ir. Arief Widjaja, M. Eng<br>NIP. 19660523 199102 1 001     | (Penguji 1)  | <br>..... |
| 3. Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M. Eng<br>NIP. 19611021 198603 1 001       | (Penguji 2)  | <br>..... |



Dekan Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., MT  
NIP. 19690507 199512 1 001

# **PENGOLAHAN LIMBAH LOGAM Cr SEBAGAI PENGHASIL BIO-LISTRIK MENGGUNAKAN REAKTOR *MICROBIAL FUEL CELL***

Nama Mahasiswa : Prapti Ira Kumlasari  
NRP : 2315201006  
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M. Eng

## **ABSTRAK**

Kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat yang mengakibatkan konsumsi bahan bakar fosil ikut meningkat. Penggunaan energi fosil dapat berdampak pada persoalan lingkungan. Pengembangan sumber energi alternatif sangat penting untuk mengurangi krisis energi masa depan dan mengurangi dampak negatif dari polusi terhadap lingkungan. Salah satu alternatif yang bagus adalah mengembangkan *fuel cell* berbasis biologi. *Microbial fuel cell* adalah bioreaktor yang mengubah energi kimia senyawa organik menjadi energi listrik melalui reaksi katalitik mikroorganisme dalam kondisi anaerob. Sebagian besar bakteri yang telah diidentifikasi mampu menghasilkan listrik dengan cara mereduksi logam. Penerapan microbial fuel cell dengan menggunakan bakteri pereduksi logam dilakukan pada penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pH pada larutan Cr(VI), pengaruh jenis dan konsentrasi bakteri yang digunakan pada produksi bio-listrik. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium. Hasil yang diperoleh dianalisa dengan multimeter agar diketahui *power density*nya dan spektrofotometer Uv-Vis untuk identifikasi logam Cr(VI) yang tereduksi menjadi logam Cr(III).

Hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil nilai *power density* maksimal pada 20.41 mW/m<sup>2</sup> dan hasil reduksi Cr(VI) sebesar 99,55% (konsentrasi awal Cr(VI) sebesar 16,79 mg/L menjadi 0,075 mg/L) ditunjukkan pada variasi jumlah bakteri awal sebesar 15% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda pada pH 4. Penurunan beban COD dikatoda sebesar 29 - 50% dan penurunan beban BOD<sub>5</sub> dianoda sebesar 85 - 95% dari variasi bakteri *Escherichia coli*. Dan untuk variasi bakteri *Pseudomonas putida* hasil nilai *power density* maksimal pada 207,84 mW/m<sup>2</sup> dan hasil reduksi Cr(VI) sebesar 93,75% (konsentrasi awal Cr(VI) sebesar 13,18 mg/L menjadi 0,82 mg/L) ditunjukkan pada variasi jumlah bakteri awal sebesar 12,5% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda pada pH 3. Penurunan beban COD dikatoda sebesar 20 - 50% dan penurunan beban BOD<sub>5</sub> dianoda sebesar 20 - 70%

Kata kunci : *microbial fuel cell*; reduksi kromium; anaerob; aerob; bio-listrik

# **Cr (VI) WASTE TREATMENT AS A BIO-ELECTRICAL PRODUCER USING REACTOR MICROBIAL FUEL CELL**

Name : Prapti Ira Kumlasari  
NRP : 2315201006  
Lecturer : Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M. Eng

## **ABSTRACT**

*Necessity of electrical energy is increasing, and the impact consumption of fossil fuels is increase too. Energy from fossil energy has an impact on environmental issues. The development of alternative energy sources is very importen for the future energy and reduction of environment pollution. One of alternatifve energy is fuel cell besed from biology. Microbial fuel cell is one of the developing methods for alternative energy, which by as produced a bioreactor converting organic compounds into bioelectrical energy with the aid of catalytic reaction of microorganisme in anaerobic condition. A large number of micro-organisms can be reduce metal. In this study used Specific bacteri for metal reduction at bioreactor microbial fuel cell.*

*Aims of this study to examine the effect of ph on Cr (VI) solution, type and concentration of bacteria used on bio-electricity production. This research does at laboratory scale. Results obtained would be analyzed power density with multimeter and used spectrophotometer Uv-Vis for the identification of Cr (VI) metal.*

*The results of this experiment showed the maximum of power density at 20,41 mW/m<sup>2</sup> and the highest Cr (VI) reduction in the amount of 99,55% from 16.79 mg/L to 0.075 mg/L was achieved at pH 4 and 15% of bacteria concentration. The maximum COD decreasing in cathodic was 28 - 50% and BOD<sub>5</sub> decreasing in anodic was 89 - 95% from Escherichia coli bacteria variation. and from Pseudomonas putida bacteria variation showed the maximum of power density at 207,84 mW/m<sup>2</sup> and the highest Cr (VI) reduction in the amount of 93,75% from 13,18 mg/L to 0,82 mg/L was achieved at pH 4 and 15% of bacteria concentration. The maximum COD decreasing in cathodic was 20 - 50% and BOD<sub>5</sub> decreasing in anodic was 20 - 70%*

*Key words: microbial fuel cell; chromium reduction; anaerob; aerob; bio-electricity*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadiran Allah swt, karena berkat dan rahmat karunia-Nya sehingga laporan tesis ini dapat terselesaikan. Laporan tesis yang berjudul **“Pengolahan Limbah Logam Cr Sebagai Penghasil Bio-Listrik Dengan Menggunakan Reaktor *Microbial Fuel Cell*”** merupakan syarat untuk menyelesaikan program magister Teknik Kimia di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam kesempatan ini saya juga ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

1. Bapak Juwari, S.T., M.T., M.Eng, selaku Ketua Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
2. Bapak Dr. Tantular Nurtono, S.T, M. Eng selaku Kaprodi Pascasarjana Teknik Kimia.
3. Ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng selaku Kepala Laboratorium Pengolahan Limbah Industri serta dosen pembimbing yang telah memberikan banyak masukan dan saran serta *support* dan motivasi selama pengerjaan tesis ini.
4. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Kimia yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
5. Orang tua serta saudara-saudara saya atas doa, bimbingan, perhatian, serta kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.
6. Keluarga Besar Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Helda, Rita, Afan, Sarah, Mas Heri, Angkatan kunfu panda dan sahabat-sahabat yang lain tidak bisa disebutkan satu-persatu di sini, terima kasih atas *support* dan doa dikala suka dan duka.

Penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak demi perbaikan penelitian dan mutu penulisan selanjutnya. Terimakasih.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
Lembar Pengesahan .....	iii
Abstrak .....	v
Abstract .....	vii
Kata Pengantar .....	ix
Daftar Isi .....	xi
Daftar Tabel .....	xv
Daftar Gambar .....	xix
Daftar Notasi .....	xxi
Bab I Pendahuluan .....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	6
C. Batasan Masalah .....	6
D. Tujuan Penelitian .....	6
E. Manfaat Penelitian .....	7
Bab II Tinjauan Pustaka .....	9
A. <i>Fuel Cell</i> .....	9
1. Sejarah Perkembangan <i>Fuel Cell</i> .....	9
2. Prinsip Dasar <i>Fuel Cell</i> .....	10
3. Jenis – jenis <i>Fuel Cell</i> .....	11
B. <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	14
1. Prinsip Kerja <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	15
2. Kompartemen Anoda .....	16
3. Kompartemen Katoda .....	17
4. Elektroda .....	17
C. Kromium(Cr) .....	18
D. <i>Escherichia coli</i> .....	19
E. <i>Pseudomonas putida</i> .....	20
F. Pertumbuhan Mikroorganisme .....	21

Bab III Metodologi Penelitian .....	25
A. Variabel Penelitian .....	25
1. Kondisi Operasi .....	25
2. Variabel Percobaan .....	25
B. Bahan, Alat dan Skema Alat Penelitian .....	26
1. Bahan Penelitian .....	26
2. Alat Penelitian .....	26
3. Skema Alat Penelitian .....	26
C. Diagram Alir Penelitian .....	27
D. Tahapan Penelitian .....	28
1. Persiapan Penelitian .....	28
a. Pembuatan Larutan Cr(VI) .....	28
b. Preparasi Elektroda .....	28
c. Preparasi Jembatan Garam .....	28
2. Proses Eksperimen .....	28
a. Proses Eksperimen <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	28
b. Pengambilan Sampel .....	29
3. Tahap Analisa Proses .....	29
a. Analisa pH .....	29
b. Analisa Produksi Listrik .....	29
c. Analisa Reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) (ASTM D 1687-92) .....	29
d. Analisa Populasi Bakteri .....	30
e. Analisa COD (ASTM D-1252) .....	31
f. Rencana Jadwal Penelitian .....	32
BAB IV Hasil dan Pembahasan .....	33
A. Reaktor <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	33
B. Pertumbuhan Bakteri .....	36
C. Produksi Listrik dengan bakteri <i>Escherichia coli</i> pada ruang anoda .....	37
D. Reduksi logam Cr <sup>6+</sup> dengan bakteri <i>Escherichia coli</i>	

pada ruang anoda .....	42
E. Produksi Listrik dengan bakteri <i>Pseudomonas putida</i>	
pada ruang anoda .....	45
F. Reduksi logam Cr <sup>6+</sup> dengan bakteri <i>Pseudomonas putida</i>	
pada ruang anoda .....	48
G. Perbandingan Produksi Listrik dan Reduksi logam Cr <sup>6</sup>	
dengan bakteri <i>Escherichia coli</i> dan <i>Pseudomonas putida</i>	
pada ruang katoda .....	50
BAB V Kesimpulan .....	51
A. Kesimpulan .....	51
Daftar Pustaka .....	53
Appendiks .....	57



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Jenis - jenis <i>Fuel Cell</i> .....	11
Tabel 2.2. Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	15
Tabel 3.1 Rencana dan Jadwal Kegiatan Penelitian Tahun 2016-2017.....	32
Tabel A.1 Nilai <i>power density</i> pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> dengan variasi pH 5 pada ruang katoda .....	57
Tabel A.2 Nilai <i>power density</i> pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> dengan variasi pH 4 pada ruang katoda .....	58
Tabel A.3 Nilai <i>power density</i> pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> dengan variasi pH 3 pada ruang katoda .....	58
Tabel A.4 Nilai <i>power density</i> pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dengan variasi pH 5 pada ruang katoda..	59
Tabel A.5 Nilai <i>power density</i> pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dengan variasi pH 4 pada ruang katoda..	60
Tabel A.6 Nilai <i>power density</i> pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dengan variasi pH 3 pada ruang katoda..	60
Tabel A.7 Data pertumbuhan bakteri <i>Escherichia coli</i> pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 5 pada ruang katoda .....	62
Tabel A.8 Data pertumbuhan bakteri <i>Escherichia coli</i> pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 4 pada ruang katoda .....	62
Tabel A.9 Data pertumbuhan bakteri <i>Escherichia coli</i> pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 3 pada ruang katoda .....	63
Tabel A.10 Data pertumbuhan bakteri <i>Pseudomonas putida</i> pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 5 pada ruang katoda .....	63
Tabel A.11 Data pertumbuhan bakteri <i>Pseudomonas putida</i> pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 4 pada ruang katoda .....	64
Tabel A.12 Data pertumbuhan bakteri <i>Pseudomonas putida</i> pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 3 pada ruang katoda .....	64

Tabel A.13	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 12,5% dengan variasi pH 5 pada ruang katoda .....	65
Tabel A.14	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 15% dengan variasi pH 5 pada ruang katoda .....	65
Tabel A.15	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 17,5% dengan variasi pH 5 pada ruang katoda .....	66
Tabel A.16	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 12,5% dengan variasi pH 4 pada ruang katoda .....	66
Tabel A.17	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 15% dengan variasi pH 4 pada ruang katoda .....	66
Tabel A.18	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 17,5% dengan variasi pH 4 pada ruang katoda .....	67
Tabel A.19	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 12,5% dengan variasi pH 3 pada ruang katoda .....	67
Tabel A.20	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 15% dengan variasi pH 3 pada ruang katoda .....	67
Tabel A.21	Nilai BOD <sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> 17,5% dengan variasi pH 3 pada ruang katoda .....	68
Tabel A.22	Nilai BOD <sub>5</sub> pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dan berbagai variasi pH pada ruang katoda .....	68
Tabel A.23	Nilai COD pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> dan berbagai variasi pH pada ruang katoda .....	69
Tabel A.24	Nilai COD pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dan berbagai variasi pH pada ruang katoda .....	69
Tabel A.25	Hasil reduksi ion CR(VI) pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> dan berbagai variasi pH pada ruang katoda....	70
Tabel A.26	Hasil reduksi ion CR(VI) pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dan berbagai variasi pH pada ruang katoda .....	71
Tabel A.27	Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> dan berbagai variasi pH pada ruang anoda .....	71

Tabel A.28	Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dan berbagai variasi pH pada ruang anoda .....	72
Tabel A.29	Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Escherichia coli</i> dan berbagai variasi pH pada ruang katoda .....	72
Tabel A.30	Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dan berbagai variasi pH pada ruang katoda .....	73

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Skema Cara Kerja Microbial Fuel Cell .....	14
Gambar 2.2. Substrat organik (asam asetat) yang teroksidasi dalam ruang anoda (anaerob); proton dan elektron yang dihasilkan .....	16
Gambar 2.3 Reaksi dari reduksi kromium pada reaktor <i>microbial fuel cell</i> .....	17
Gambar 2.4 Bakteri <i>Escherichia coli</i> .....	20
Gambar 2.5 Bakteri <i>Pseudomonas putida</i> .....	21
Gambar 2.6 Grafik Pertumbuhan Mikroba dalam Biakan Sistem Tertutup .....	23
Gambar 3.1 Rangkaian Alat <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	26
Gambar 3.2 Diagram Alir <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	27
Gambar 3.3 Hemasitometer ( <i>Counting Chamber</i> ) .....	31
Gambar 4.1 Reaktor <i>Microbial Fuel Cell</i> .....	33
Gambar 4.2 Mekanisme pergerakan elektron dan proton pada reaktor <i>microbial fuel cell</i> .....	35
Gambar 4.3 Pertumbuhan Bakteri <i>Escherichia coli</i> .....	36
Gambar 4.4 Pertumbuhan Bakteri <i>Pseudomonas putida</i> .....	37
Gambar 4.5 Nilai <i>Power density</i> dengan variasi (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3 .....	38
Gambar 4.6 Hubungan <i>power density</i> terhadap konsentrasi awal bakteri .....	39
Gambar 4.7 Hubungan populasi bakteri dengan BOD <sub>5</sub> dengan waktu variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3 .....	41
Gambar 4.8 Konsentrasi Cr(VI) sisa hasil reduksi pada reaktor MFC dengan variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3 .....	43
Gambar 4.9 Hubungan pH larutan di katoda dengan persen penurunan Cr(VI) .....	44
Gambar 4.10 Nilai <i>Power density</i> dengan variasi bakteri <i>Pseudomonas putida</i> dan variasi (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3 .....	46

Gambar 4.11	Hubungan populasi bakteri dengan BOD <sub>5</sub> dengan waktu variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3 .....	47
Gambar 4.12	Konsentrasi Cr(VI) sisa hasil reduksi pada reaktor MFC dengan variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3 .....	49
Gambar 4.13	Hubungan pH larutan di katoda dengan persen penurunan Cr(VI) .....	50
Gambar A.1	Kurva kalibrasi logam Cr(VI) .....	70

## DAFTAR NOTASI

A	= luas permukaan	$\text{m}^2$
I	= kuat arus listrik	mA
P	= <i>power density</i>	$\text{mw}/\text{m}^2$
V	= beda potensial	volt

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang**

Kebutuhan energi listrik di Indonesia makin berkembang dan menjadi bagian tak terpisahkan dari kebutuhan masyarakat sehari-hari, seiring dengan pesatnya peningkatan pembangunan di bidang teknologi, industri dan informasi. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012 terdapat empat sektor utama pengguna energi, yaitu sektor rumah tangga, komersial, industri dan transportasi. Saat ini pengguna energi terbesar adalah sektor industri dengan pangsa 44,2 persen. Konsumsi terbesar berikutnya adalah sektor transportasi dengan pangsa 40,6 persen, diikuti dengan sektor rumah tangga sebesar 11,4 persen dan sektor komersial sebesar 3,7 persen.

Namun pada pelaksanaannya penyedia energi listrik yang dilakukan oleh PT.PLN (Persero), selaku lembaga resmi yang ditunjuk oleh pemerintah untuk mengelola masalah kelistrikan di Indonesia, sampai saat ini masih belum dapat memenuhi kebutuhan masyarakat akan energi listrik secara keseluruhan (Ramani,K.V,1992). Ketidaksiapan Perusahaan Listrik Negara (PLN) untuk menyuplai energi listrik bagi konsumen yang terus mengalami peningkatan akan mengganggu energi listrik yang disalurkan. Akibatnya sering terjadi pemadaman bergilir yang akan mengurangi kenyamanan konsumen dalam melakukan aktivitas keseharian ( Purwati, dkk., 2014).

Wilayah Indonesia yang luas terkandung beragam potensi energi yang berpeluang untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Potensi energi tersebut berupa energi primer atau energi fosil (minyak bumi, gas dan batubara) dan potensi energi terbarukan atau alternatif (Agung, 2013). Energi fosil digunakan untuk konversi energi. Hasil konversi tersebut dapat berupa energi mekanik, listrik dan panas. Semua bahan bakar fosil yang dikonsumsi di dunia, kebanyakan digunakan untuk keperluan transportasi.

Hasil konversi energi yang lain adalah pembangkit tenaga listrik. Listrik adalah salah satu bentuk energi yang ditimbulkan akibat dari pergerakan

elektron. Listrik menjadi daya hidup yang vital bagi kehidupan di dunia ini. Listrik di industri terutama digunakan sebagai sumber tenaga penggerak mesin-mesin industri.

Kebutuhan akan energi listrik saat ini semakin meningkat yang mengakibatkan konsumsi bahan bakar fosil yang tidak dapat di perbaharui seperti minyak bumi dan gas alam ikut meningkat secara signifikan. Mengakibatkan kekurangan sumber energi, meningkatkan harga energi dan peningkatan jumlah polutan ke lingkungan (ITB News, 2011; Adek, 2014). Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil setidaknya memiliki tiga ancaman serius, yakni: (1) Menipisnya cadangan minyak bumi yang diketahui (bila tanpa temuan sumur minyak baru), (2) Kenaikan/ketidakstabilan harga akibat laju permintaan yang lebih besar dari produksi minyak, dan (3) Polusi gas rumah kaca (terutama CO<sub>2</sub>) akibat pembakaran bahan bakar fosil (Imam Kholiq, 2015).

Penggunaan energi fosil yang berdampak pada persoalan lingkungan, menimbulkan efek rumah kaca yang pada akhirnya menyumbang pada peningkatan pemanasan global (*global warming*), hujan asam, meningkatnya keasaman tanah dan memicu berbagai penyakit yang mengancam jiwa manusia. Sebagai ilustrasi, pada dekade 1990-an 85% dari produksi energi listrik di Indonesia setara dengan sekitar 43.200 GWh dihasilkan oleh energi fosil, berarti terjadi pembebasan 42 juta ton CO<sub>2</sub>, 41,5 ribu ton SO<sub>2</sub> serta 30 ribu ton NO<sub>x</sub> ke atmosfer (Agung, 2013). Polutan tersebut selain mengancam manusia secara langsung, akibatnya juga dirasakan oleh lingkungan sekitarnya termasuk tumbuh-tumbuhan dan gedung-gedung (Hendratta Suhada, 2001).

Untuk alasan ini, mengembangkan sumber energi alternatif sangat penting untuk mengurangi krisis energi masa depan dan mengurangi dampak negatif dari polusi terhadap lingkungan. Berbagai macam cara telah diupayakan sebagai solusi ketergantungan penggunaan energi yang berasal dari fosil. Energi terbarukan dipandang salah satu alternatif yang bagus untuk mengatasi permasalahan krisis energi. Metode pengembang energi listrik dari sumber yang dapat terbarukan tanpa menghasilkan emisi karbon dioksida



(CO<sub>2</sub>) dan ramah lingkungan telah ditemukan dan dikembangkan oleh para peneliti (Du, dkk., 2007 dalam Fitrinaldi, 2011)

Salah satu cara pembangkit energi alternatif yang belakangan ini marak dikembangkan oleh para ahli adalah pembangkit berbasis *fuel cell*. Teknologi *fuel cell* (sel bahan bakar) dewasa ini masih terus berkembang pesat dan disempurnakan. Fuel cell bekerja berdasarkan prinsip pembakaran listrik-kimiawi yang mana akan memproduksi energi listrik arus searah, terdiri dari elektrolit yang memisahkan katoda dari anoda yang bertugas menghantar ion. *Fuel cell* seringkali dianggap sangat menarik dalam aplikasi modern karena efisiensi tinggi dan penggunaan bebas emisi, berlawanan dengan bahan bakar umum seperti methane atau gas alam yang menghasilkan karbon dioksida. Satu-satunya hasil produk dari bahan bakar yang beroperasi menggunakan hidrogen murni adalah uap air.

Secara umum, *fuel cell* memiliki beberapa keunggulan, seperti memiliki efisiensi yang tinggi yang dapat digunakan pada berbagai skala pembangkit energi, jika hidrogen digunakan sebagai bahan bakar maka polusi emisi dapat dikurangi, tidak membutuhkan alat - alat penggerak, seperti pompa, kompressor, dan blower. Selain itu *fuel cell* dapat menggunakan berbagai jenis bahan bahan bakar, serta memiliki kecepatan yang hampir sama dengan baterai dalam memberikan listrik (Mench 2008). Adapun jenis *fuel cell* yang ada pada saat ini yaitu: *Alkaline Fuel cells* (AFC); *proton elektrolyt membrane* (PEM); *Phosphoric Acid Fuel cells* (PAFC); *Molten carbonate Fuel cells* (MCFC); *Solid oxide Fuel cells* (SOFC); *Direct methanol Fuel cells* (DMFC) dan *Microbial Fuel cells* (MFC). Semua jenis fuel cell ini ditentukan berdasarkan material elektrolit yang digunakan sebagai penghantar protonnya (Suhada, 2001).

*Microbial fuel cell* adalah bioreaktor yang mengubah energi kimia senyawa organik menjadi energi listrik melalui reaksi katalitik mikroorganisme dalam kondisi anaerob. Salah satu contoh mikroorganisme yang dapat digunakan adalah bakteri. Bakteri dalam *microbial fuel cell* selain dapat menghasilkan listrik dapat juga membiodegradasi bahan organik atau limbah.

Sebagian besar bakteri yang telah diidentifikasi mampu menghasilkan listrik pada *fuel cell* adalah bakteri pereduksi logam. MFC dapat dihasilkan oleh bakteri penghasil mediator atau penukar elektron dari sekelompok bakteri yang terdiri dari *Alcaligenes faecalis*, *Enterococcus faecium*, dan *Pseudomonas aeruginosa* (Rabaey et al., 2004)

Secara umum mekanisme dari *microbial fuel cell* adalah substrat dioksidasi oleh bakteri menghasilkan elektron dan proton pada anoda. Elektron ditransfer melalui sirkuit eksternal, sedangkan proton didifusikan melalui larutan menuju katoda. Pada katoda, reaksi elektron dan proton terhadap oksigen akan menghasilkan air (Cheng et al. 2006). Menurut Li dkk, 2011 dalam Purnomo (2015) energi listrik yang dihasilkan pada proses pengolahan limbah menggunakan teknologi microbial fuel cell memiliki potensi sebagai pemasok sumber energi. Penggunaan air limbah dalam sistem *microbial fuel cell* mempunyai keuntungan tersendiri yaitu polutan dalam limbah cair dapat menjadi sumber karbon untuk menghasilkan energi listrik.

Logam kromium (Cr) merupakan salah satu contoh logam berat. Logam kromium (Cr) terdiri atas ion logam Cr (VI) dan ion logam Cr (III). Ion logam Cr(VI) dimungkinkan dalam bentuk dikromat ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), hidrokromat ( $\text{HCrO}_4$ ) atau kromat ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) sedangkan ion logam Cr(III) dalam bentuk kromium valensi tiga berhidrat (*hydrated trivalent chromium*),  $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  dan kompleks hidoksida kromium ( $\text{Cr}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$  atau  $\text{Cr}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4^+$ ). Adanya dua keadaan oksidasi dari Cr tersebut mengakibatkan perbedaan toksisitas dan karakteristik transport. Ion logam Cr(VI) adalah sangat toksik serta kelarutan dalam air tinggi sedangkan ion logam Cr(III) adalah kurang toksik dan kelarutan dalam air rendah (Silva et al, 2009).

Krom merupakan salah satu bahan pencemar logam berat yang berbahaya di alam. Meskipun belum banyak peristiwa berskala besar yang diakibatkan oleh pencemaran krom, hal ini bukan berarti bebas permasalahan. Banyak kasus keracunan krom secara insidental yang cukup berbahaya bagi manusia, yakni mengakibatkan kanker paru-paru, luka bernanah yang kronis dan merusak selaput tipis hidung (Klaasen dkk, 1986 dalam Nahadi dkk, 2005).

Sumber pencemaran kromiun di lingkungan disebabkan oleh limbah-limbah hasil kegiatan industri seperti industri cat, baja, tekstil, kulit, semen, keramik, dan kertas (Khairani, dkk., 2007).

Pengolahan limbah logam Cr (VI) merupakan tantangan di bidang air dan pengolahan air limbah. Pengolahan limbah logam Cr (VI) dalam air limbah industri dapat dilakukan dengan berbagai proses kimiafisik seperti adsorpsi, sedimentasi, pemisahan elektrokimia, pertukaran ion, filtrasi dan proses membran, presipitasi kimia, dan ekstraksi pelarut (Sophia, 2016). Tetapi metode-metode ini juga memerlukan energi dan mungkin akan menghasilkan polutan yang lain.

Belakangan ini para peneliti mengembangkan pengolahan limbah menggunakan metode biologi. Dengan pengolahan limbah menggunakan metode ini memiliki keuntungan pada biaya yang lebih murah dibandingkan dengan metode fisika dan kimia. Proses pengolahan limbah logam Cr (VI) menjadi Cr (III) menggunakan katalis mikrobiologis banyak dikembangkan baru-baru ini. Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Shen dan Wang (1993) dan Ishibashi (1990) bakteri perairan air tawar khususnya *Escherichia coli* dan *Pseudomonas* dalam keadaan tertentu dapat melakukan reaksi enzimatik yang dapat mengkatalisis terjadinya transformasi Cr (VI) yang bersifat toksik menjadi Cr (III) yang kurang toksik.

Dewasa ini telah dikembangkan reaktor microbial fuel cell yang dimodifikasi, selain menghasilkan energi listrik juga dapat digunakan untuk pengolahan limbah. Pada penelitian Zhang dkk (2015) penggunaan reaktor microbial fuel cell dalam pengolahan limbah lindi yang dapat menaikkan persentase penyisihan COD sebesar 89,1% dan amoniak sebanyak 99,2%. Pada penelitian Sophia (2016), penggunaan reaktor microbial fuel cell dalam mereduksi larutan Cr (VI) menghasilkan penurunan konsentrasi Cr (VI) sebesar 5 mg/L dan 10 mg/L menjadi 0,2 mg/L dan 2 mg/L.

Dari penelitian tersebut maka direncanakan penelitian berikutnya mencari bakteri yang paling optimal pada proses produksi, penurunan konsentrasi Cr (VI), dan kenaikan persentase penyisihan COD

## B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka disusunlah rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pH pada reagen katoda terhadap produksi listrik yang maksimum menggunakan reaktor *microbial fuel cells*.
2. Bagaimana pengaruh jenis bakteri dalam menghasilkan konsentrasi  $H^+$  dalam reaktor *microbial fuel cells*.
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi bakteri dalam menghasilkan konsentrasi  $H^+$  dalam reaktor *microbial fuel cells*.

## C. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Reaktor yang digunakan dalam sistem *microbial fuel cells* ini adalah reaktor *dual-chamber*.
2. Reagen pada katoda menggunakan larutan logam Cr (VI) dengan konsentrasi 18 mg/L
3. Sistem penukar kation pada reaktor *microbial fuel cells* adalah jembatan garam. Jembatan garam dibentuk dengan melarutkan 1M KCl garam dalam 5% agar.
4. Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis elektroda carbon.
5. pH yang digunakan sekitar pH 6 – 7.

## D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh pH pada larutan katoda terhadap produksi listrik yang maksimum dengan menggunakan reaktor *microbial fuel cells*.
2. Mengetahui bakteri yang paling berpengaruh untuk mereduksi logam Cr(VI) menjadi logam Cr(III) dengan menggunakan reaktor *microbial fuel cell*.

3. Mengetahui konsentrasi bakteri yang paling berpengaruh untuk mereduksi logam Cr(VI) menjadi logam Cr(III) dengan menggunakan reaktor *microbial fuel cell*.

#### **E. Manfaat Penelitian**

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi untuk mendapatkan energi alternatif yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan polusi.

## BAB II

### Tinjauan Pustaka

#### A. *Fuel Cell*

*Fuel cell* merupakan suatu teknologi yang akan merubah masa depan dalam pengolahan bahan bakar tertentu menjadi suatu energi yang diperlukan untuk menggerakkan bermacam-macam peralatan. *Fuel cell* merupakan teknologi elektrokimia yang secara kontinyu mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik selama terdapat bahan bakar dan pengoksidan (Shukla et al. 2004). *Fuel cell* tersusun atas anoda, katoda dan elektrolit. Anoda berperan sebagai tempat terjadinya pemecahan hidrogen ( $H_2$ ) menjadi proton dan elektron (listrik). Katoda berperan sebagai tempat terjadinya reaksi penggabungan proton, elektron dan oksigen untuk membentuk air. Elektrolit adalah media untuk mengalirkan proton.

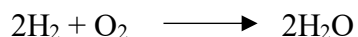
##### 1. Sejarah Perkembangan *Fuel Cell*

*Fuel cell* telah didemonstrasikan oleh Sir William Robert Grove, seorang ahli hukum merangkap sebagai ahli fisika amatir, pada tahun 1839, dengan melakukan pembalikan elektrolisa air, elektrode yang digunakan adalah platina. Pada tahun 1889, Charles Langer dan Ludwig Mond pertama kali menggunakan istilah *fuel cell*, pada saat mencoba membuat mesin generator dengan menggunakan udara dan gas arang. Pada tahun 1932 Francis Bacon berhasil mengembangkan *fuel cell*. Untuk menerapkan *fuel cell* dalam penggunaan praktis baru dapat dilakukan 27 tahun kemudian, yaitu sebagai penghasil tenaga listrik untuk alat las dengan kapasitas 5 kW. Mulai tahun 1950 pihak NASA di Amerika Serikat telah melakukan pemanfaatan untuk program angkasa luar mereka yaitu untuk pesawat roket Appolo dan Gemini. Selama lebih dari 30 tahun, US Department of Technology telah melakukan banyak penelitian dan pengembangan dan pada tahun 1987 mereka mulai menerapkannya pada kendaraan. (Hendrata, 2001)

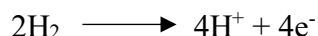
## 2. Prinsip Dasar *Fuel Cell*

*Fuel cell* bekerja berdasar prinsip pembakaran listrik-kimiawi, *cell* ini akan memproduksi energi listrik arus searah. *Fuel cell* ini terdiri dari elektrolit yang memisahkan katoda dari anoda, elektrolit hanya dapat menghantar ion saja, sedangkan elektron tidak dapat melewati elektrolit, jadi elektrolit ini bukan penghantar listrik dan juga menghindarkan terjadinya reaksi kimia. Pada anoda akan dialirkan secara berkesinambungan bahan bakar dan pada katode dialirkan oksigen pengaliran ini dilakukan secara terpisah. Karena pengaruh katalisator pada elektroda, maka molekul-molekul dari gas yang dialirkan akan berubah menjadi ion. Reaksi pada anoda menghasilkan elektron yang bebas, sedang pada katoda elektron yang bebas akan diikat.

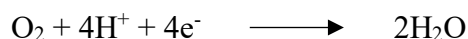
Elektron-elektron bebas yang terjadi harus dialirkan keluar melalui penghantar menuju ke anoda, agar proses listrik-kimiawi dapat berlangsung. Reaksi kimia pada *fuel cell*.



Pada anoda hidrogen di oksidasi menjadi proton:



Setiap molekul  $\text{H}_2$  terpecah menjadi dua atom  $\text{H}^+$ (proton), sedang setiap atom hidrogen melepaskan elektronnya. Proton ini akan bergerak menuju katoda melewati membran. Elektron yang terbentuk akan menghasilkan arus listrik kalau dihubungkan dengan penghantar listrik menuju katoda. Pada katoda oksigen dirubah :



Molekul oksigen akan bergabung dengan empat elektron, menjadi ion oksigen yang bermuatan negatif untuk selanjutnya bergabung lagi dengan proton yang mengalir dari anoda. Setiap ion oksigen akan melepaskan kedua muatan negatifnya dan bergabung dengan dua proton, sehingga terjadi oksidasi menjadi air.

### 3. Jenis – Jenis Fuel Cell

Jenis dari pada *fuel cell* ditentukan oleh material yang digunakan sebagai elektrolit yang mampu menghantar proton. Pada saat ini ada 8 jenis *fuel cell* yaitu:

- a. *Alkaline* (AFC)
- b. *Proton exchange membrane*, juga disebut *proton elektrolit membrane* (PEM)
- c. *Phosphoric Acid* (PAFC)
- d. *Molten carbonate* (MCFC)
- e. *Solid oxide* (SOFC)
- f. *Direct methanol fuel cells* (DMFC)
- g. *Regenerative fuel cells*
- h. *Microbial fuel cell*

Tabel 2.1 Jenis - jenis *Fuel Cell*

Jenis	Elektrolit	Suhu Operasi (°C)	Karakteristik	Penggunaan
Alkaline (AFC)	KOH	60 – 120	Efisiensi energi tinggi memiliki kepekaan terhadap CO <sub>2</sub>	Pesawat ruang angkasa, kendaraan
Polymer Ex-change Membrane (PEM)	Polymer elektrolit (H <sup>+</sup> )	60 – 100	Kerapatan energi tinggi memiliki kepekaan terhadap CO (<100ppm)	Kendaraan (sedan, bis, minivan), stasiun pembangkit panas
Phosphoric acid Fuel Cell (PAFC)	Phosphor Acid (H <sup>+</sup> )	160 – 200	Efisiensi energi terbatas, peka terhadap CO (<1,5% Vol)	Stasiun pembangkit panas, kendaraan
Molten Carbonate	Molten carbonate (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	500 – 650	Problem korosi	Stasiun pembangkit energi panas, pembangkit energi listrik



Solid Oxyde (SOFC)	Lapisan Keramik ( $O_2$ )	800 – 1000	Efisiensi sistem tinggi, temperatur operasi perlu diturunkan	Pembangkit energi panas, penggabung stasiun pembangkit dengan turbin gas
Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)	Elektrolit Polymer ( $H^+$ )	60 – 120	Efisiensi sistem tinggi peka terhadap. Hasil oksidasi di anoda	Kendaraan

Sumber : Suhada (2001)

Dari tabel 2.1 dapat dilihat jenis dari pada elektrolit untuk masing-masing *fuel cell* dan operasi temperatur, karakteristik dan penggunaannya. *Fuel cell* mempunyai efisiensi yang cukup tinggi, dari 40% sampai 70%, tergantung dari jenis *fuel cell*, yang paling tinggi adalah *alkaline* (AFC), *solid oxyde* (SOFC), *direct methanol fuel cell*(DMFC) dan *regenerative fuel cell*.

*Fuel cell* mempunyai kepekaan terhadap zat- zat tertentu seperti  $CO_2$ , CO, korosi dan produk oksidasi. Penggunaan dari pada *fuel cell* ini terutama untuk menghasilkan energi yang dipakai pada program angkasa luar, power station penghasil listrik atau energi panas dan untuk kendaraan.

*Alkaline fuel cells*(AFC) menggunakan *alkaline potassium, hydroxyde* sebagai elektrolit, dapat menghasilkan efisiensi sampai 70%. Banyak digunakan oleh NASA untuk misi ulang-alik angkasa luar. Biayanya sangat mahal, sehingga tidak dipakai untuk komersial.

*Proton exchange membrane* (PEM) memiliki membran yang terbuat dari plastik tipis yang pada kedua sisinya dilapisi dengan platina. Jenis ini sangat sesuai untuk kendaraan, karena mampu beroperasi pada temperatur yang rendah. Harganya relatif murah, sehingga dapat digunakan untuk alat listrik, kamera video dan telepon selular.

*Fuel cell* PEM memiliki kepadatan energi yang tinggi (*high energy density*). *Proton exchange membrane fuel cells* dari beberapa produsen.

*Phosphoric acid fuel cells* (PAFC) sudah banyak digunakan untuk penghasil listrik di rumah sakit, hotel, perkantoran, sekolah dan stasiun penghasil listrik.

*Molten carbonate* (MCFC) beroperasi pada temperatur yang tinggi sehingga hanya dapat digunakan untuk keperluan industri. Jenis ini dapat dipakai untuk menghasilkan energi yang besar, energi sebesar 10 kW dan 2 MW telah diuji coba di Jepang dan Itali.

*Solid oxide* (SOFC) ini menggunakan material dari keramik keras, memunculkan untuk operasi temperatur tinggi, banyak dicoba untuk keperluan stasiun pembangkit tenaga listrik. Cell ini berbentuk tabung. Jepang telah mencoba dengan tenaga yang dihasilkan sebesar 25 kW dan di Eropa sudah dicoba sebesar 100 kW, percobaan sebesar 220 kW sedang dilakukan.

*Direct methanol fuel cell* (DMFC) mirip dengan *proton exchange elektrolyt* (PEM), yaitu sama-sama menggunakan plastik polymer sebagai membran. Pada DMFC hidrogen diambil secara langsung oleh katalisator anoda dari methanol cair, sehingga tidak diperlukan sebuah *reformer* bahan bakar.

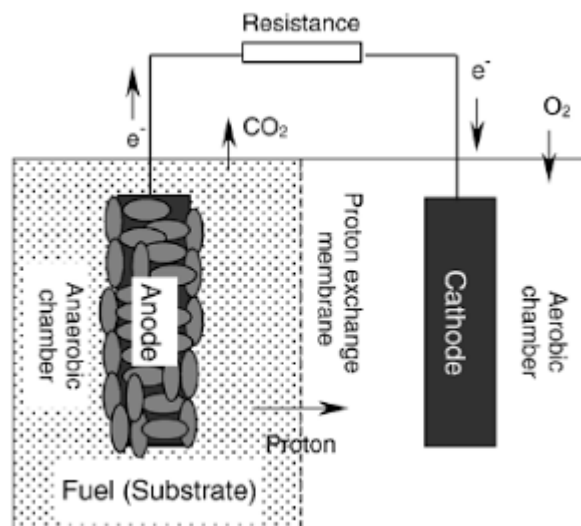
*Regenerative fuel cell* merupakan jenis yang terbaru. Dengan menggunakan elektrolisa tenaga solar cell, maka bahan-bahan yang diperlukan oleh *fuel cell* diambil dari air dengan cara mengubahnya menjadi hidrogen dan oksigen, yang selanjutnya dapat menghasilkan tenaga listrik, panas dan air. Air ini didaur ulang dengan proses yang sama (Hendrata, 2001).

*Microbial fuel cell* merupakan salah satu dari *fuel cell* berbasis biologi. Penggunaan mikroba dalam *fuel cell* ini menggantikan fungsi dari enzim, sehingga dihasilkan substrat yang lebih murah (Shukla et al. 2004). Prinsip kerja MFC mirip dengan hidrogen *fuel cell*, yaitu terdapat aliran proton dari ruang anoda menuju ruang katoda melalui membran

elektrolit dan aliran elektron yang bergerak ke arah yang sama melalui kabel konduksi (Hoogers 2002).

### B. *Microbial Fuel Cell*

*Microbial fuel cell* (MFC) merupakan salah satu cara untuk memproduksi energi secara berkesinambungan dalam bentuk listrik dari bahan-bahan yang dapat didegradasi. *Microbial fuel cell* adalah alat untuk mengonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalitik dari mikroorganisme (Allan dan Benneto 1993). *Microbial fuel cell* membangkitkan listrik dengan mengoksidasi bahan organik secara anaerob melalui bantuan bakteri. Aktivitas katalitik dan transfer proton dilakukan dengan menggunakan enzim atau tambahan mediator (Kordesch dan Simader 2001).



Gambar 2.1 Skema cara kerja *microbial fuel cell*

Menurut Lovley (2006), *microbial fuel cell* memiliki beberapa kelebihan yaitu dapat menghasilkan listrik dari sampah organik dan biomassa terbaru. Bakteri mampu menjadi katalis dan beradaptasi dengan baik terhadap bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah lingkungan sehingga menghasilkan elektron.

Berbagai bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell* seperti glukosa, pati, asam lemak, asam amino dan protein,

serta air limbah dari manusia dan hewan (idham, 2009). Percobaan *microbial fuel cell* pada berbagai jenis substrat dapat dilihat pada Tabel 2.2. Bahan anorganik dapat juga digunakan sebagai substrat dalam *microbial fuel cell* seperti busa nikel (Karthikeyan, 2016).

Tabel 2.2 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada *microbial fuel cell*

Jenis Substrat	Mikroorganisme	Referensi
Galaktosa, maltosa, sukrosa, trehalosa	<i>Proteus vulgaris</i>	Kim et al. (2000)
Pati ( <i>starch</i> )	<i>Clostridium butyricum</i> atau <i>C. beijerinckii</i>	Niessen et al. (2004)
Asetat	<i>E. coli</i> , <i>Shewanella oneidensis</i> , <i>Geobacter sulfurreducens</i>	Park et al. (2000), Debabov (2008)
Rumen sapi	<i>E. coli</i> K12	Liu et al (2004)
Glukosa	<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Chaudhuri dan Lovley (2003)

Efisiensi dan kinerja dari *microbial fuel cell* dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Menurut (Rozendal et al., 2006), dalam *microbial fuel cell* dual chamber pertumbuhan optimal bakteri membutuhkan pH netral. Menurut Liu et al (2005), faktor-faktor yang berpengaruh antara lain kecepatan degradasi substrat, kecepatan transfer elektron bakteri ke anoda, dan transfer proton dalam larutan. Menurut Chaudhuri dan Lovley (2003), kinerja *microbial fuel cell* dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan.

### 1. Prinsip Kerja *Microbial Fuel Cell*

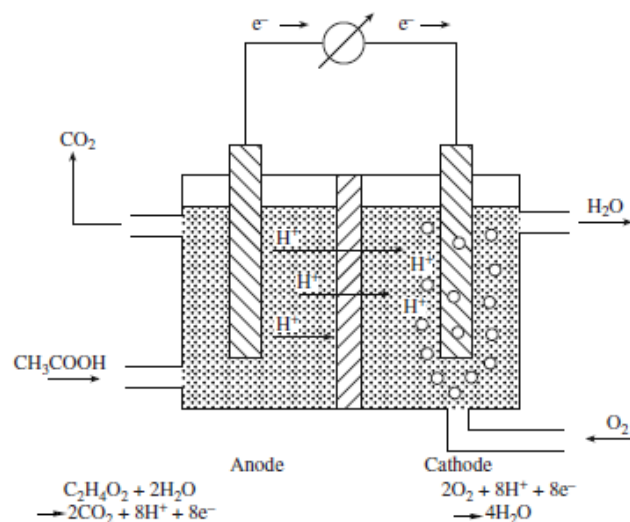
Prinsip kerja *microbial fuel cell* adalah memanfaatkan mikroba yang melakukan metabolisme terhadap medium di anoda untuk mengkatalisis pengubahan materi organik menjadi energi listrik dengan mentransfer elektron dari anoda melalui kabel dan menghasilkan arus ke katoda. Transfer elektron dari anoda diterima oleh ion kompleks di katoda yang memiliki elektron bebas.

Dalam *microbial fuel cell*, zat hasil metabolisme mikroba atau elektron yang dilepaskan mikroba saat melakukan metabolisme dapat

digunakan sebagai donor elektron. Zat hasil metabolisme mikroba umumnya merupakan senyawa yang mengandung hidrogen, seperti etanol, metanol atau gas metana. Senyawa ini dapat digunakan sebagai sumber hidrogen melalui serangkaian proses untuk memproduksi elektron dan menghasilkan arus listrik. Setiap aktivitas metabolisme yang dilakukan mikroba umumnya melibatkan pelepasan elektron bebas ke medium. Elektron ini dapat dimanfaatkan pada anoda dalam *microbial fuel cell* untuk menghasilkan arus listrik.

## 2. Kompartemen Anoda

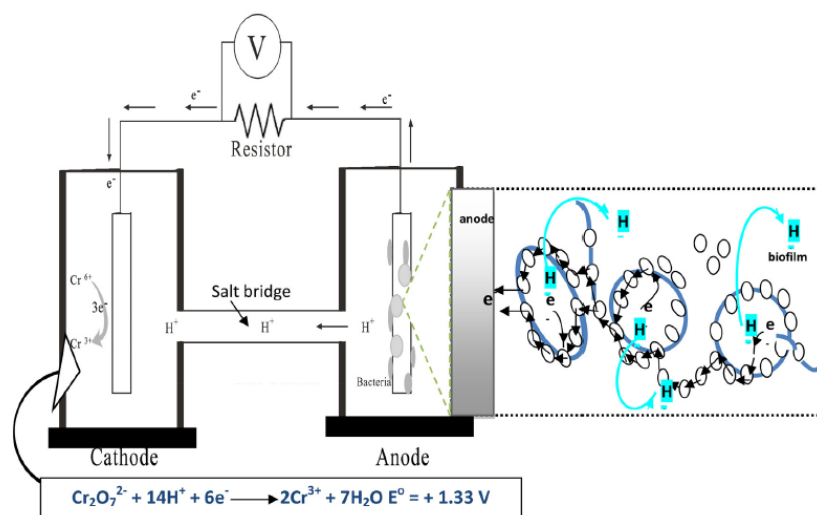
Kompartemen anoda berisikan bakteri dan material organik. Material organik yang dapat digunakan adalah glukosa, asetat, pati dan lainnya. Berdasarkan Rabaey (2003), penggunaan glukosa sebagai sumber karbon dapat meningkatkan elektrisitas hingga 89%. Selanjutnya glukosa akan terurai secara enzimatik untuk menghasilkan dua molekul piruvat yang memiliki tiga atom karbon. Proses ini dikenal sebagai glikolisis (Zahara,2011). Menurut Lovley (2008), asam asetat dan asam sederhana lainnya merupakan sumber elektron utama untuk menghasilkan arus. Arus listrik yang dihasilkan dari reaksi asam asetat yang terdegradasi. Proses reaksi oksidasi yang terjadi dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Substrat organik (asam asetat) yang teroksidasi dalam ruang anoda (anaerob); proton dan elektron yang dihasilkan

### 3. Kompartemen Katoda

Kompartemen katoda berisi cairan limbah industri. Katoda adalah elektroda dimana akseptor elektron sedang menjalani reaksi reduksi. Jika potensial listrik yang tersedia di permukaan elektroda katoda melebihi ambang zat teroksidasi, mereka dapat dikurangi (Nanchaiaiah et al., 2015). Pada ruang katoda dari *microbial fuel cell* terjadi reaksi reduksi, oleh karenanya banyak diaplikasikan pada pengolahan air limbah. Banyak penelitian yang mengacu dari reaksi tersebut seperti mereduksi zat organik (klorobenzen dan trikloroetilen) dan logam berat ( $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  dan  $\text{Fe}^{3+}$ ). Proses reaksi reduksi logam  $\text{Cr}^{6+}$  dapat dilihat di gambar 2.3



Gambar 2.3 Reaksi dari reduksi kromium pada reaktor *microbial fuel cell*

### 4. Elektroda

Elektroda harus bersifat konduktif, *biocompatible* (sesuai dengan makhluk hidup) dan secara kimia stabil di dalam larutan bioreaktor. Logam dapat berupa *stainless steel* non korosif, tetapi tembaga tidak dapat digunakan akibat adanya toksisitas ion tembaga pada bakteri. Material elektroda yang paling bermanfaat adalah karbon dalam bentuk lempeng grafik (padat, batang, atau granula), dalam bentuk material *fiber* atau berserat dan dalam bentuk *glass carbon*.

Dari ketiga bentuk karbon lempengan atau batang grafik banyak dipakai karena relatif murah, sederhana dan memiliki luas permukaan tertentu. Area permukaan yang lebih luas diberikan oleh elektroda lelehan grafik. Tetapi tidak semua area permukaan yang terindikasi dapat digunakan oleh bakteri.

Karbon aktif adalah karbon dengan struktur *amorphous* atau monokristalin yang telah diperlakukan khusus sehingga memiliki luas permukaan yang besar (300 – 2000 m<sup>2</sup>/gram). Karakteristik karbon yang ideal adalah pada rentang pH 5 – 6, titik leleh 3800°C, dan ukuran partikel kurang dari 50 µm. Resin perekat berguna untuk merekatkan karbon aktif sehingga memiliki struktur yang kuat dan tidak rapuh selama mikrobial *fuel cell* dioperasikan. Sebelum digunakan, elektroda harus dibersihkan dan diaktifkan terlebih dahulu. Elektroda direndam dalam larutan HCl 1 molar dan NaOH 1 molar masing-masing selama 1 hari. Tujuannya adalah untuk menghilangkan kontaminasi logam dan bahan organik. Kemudian elektroda disimpan dalam *aquadest* hingga saat akan digunakan.

### C. Kromium (Cr)

Kromium adalah sebuah [unsur kimia](#) dalam [tabel periodik](#) yang memiliki lambang Cr dan [nomor atom](#) 24. Kromium memiliki berat atom 51,996, titik cair 1875 °C, titik didih 2665 °C, dan massa jenis 7,19 g/ml. Kromium merupakan logam yang keras, tahan panas, elektropositif, dan merupakan penghantar panas yang baik. Kromium salah satu jenis mineral yang jika digunakan dalam jumlah kecil dapat menjaga fungsi tubuh tetap normal. Ia diperlukan oleh tubuh kita dalam metabolisme lemak dan karbohidrat. Kromium dapat juga mempengaruhi perilaku hormon insulin dalam tubuh. Kromium trivalen (Cr(III), atau Cr<sup>3+</sup>) diperlukan dalam jumlah kecil dalam [metabolisme gula](#) pada manusia. Kekurangan kromium trivalen dapat menyebabkan penyakit yang disebut [penyakit kekurangan kromium](#) (*chromium deficiency*)

Di alam unsur ini tidak ada dalam bentuk logam murni. Sumber alami kromium sangat sedikit, yaitu batuan chromite (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) dan chromic oxide

(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Di perairan alami kromium jarang ditemukan dan biasanya dalam bentuk kromium trivalent (Cr<sup>3+</sup>) dan kromium hexavalent (Cr<sup>6+</sup>). Sumber Cr<sup>6+</sup> berasal dari industri pelapisan logam dan produksi pigmen. Cr<sup>3+</sup> banyak terdapat dalam limbah industri pencelupan tekstil, keramik gelas, dan dari kegiatan penyamakan kulit. Organisme akuatik dapat terpapar oleh Cr melalui media itu sendiri, sedimen maupun makanan. Toksisitas unsur Cr terhadap organisme perairan tergantung pada bentuk kromium, bilangan oksidasinya, dan pH. Penurunan pH dan kenaikan suhu dapat meningkatkan toksisitas Cr<sup>6+</sup> terhadap organisme air. Toksisitas Cr<sup>6+</sup> lebih besar daripada toksisitas Cr<sup>3+</sup>. Cr<sup>6+</sup> yang larut di dalam air sebagian besar diserap oleh ikan melalui insang sehingga akumulasinya paling banyak didapatkan pada insang dari pada organ lainnya.

Kadar kromium pada perairan tawar biasanya kurang dari 0,001 mg/l dan pada perairan laut sekitar 0,00005 mg/l. Kromium trivalent biasanya tidak ditemukan pada perairan tawar, sedangkan pada perairan laut sekitar 50% kromium merupakan kromium trivalent. Kadar kromium yang diperkirakan aman bagi kehidupan akuatik adalah sekitar 0,05 mg/l. Kadar kromium 0,1 mg/l dianggap berbahaya bagi kehidupan organisme laut. Kadar maksimum kromium untuk keperluan air baku air minum dan kegiatan perikanan menurut Peraturan Pemerintah No. 82 tahun 2001 adalah sebesar 0,05 mg/l (Apriadi, 2005).

Kromium memiliki sifat fisika dan kimia yang titik didihnya mencapai 2672<sup>0</sup> C, dengan titik lebur 1837 - 1877<sup>0</sup> C, serta memiliki berat jenis 7,20 pada suhu 28<sup>0</sup> C. Kromium tidak larut dalam air dan asam nitrat, larut dalam asam sulfat encer dan asam klorida. Kromium tidak dapat bercampur dengan basa, oksidator, halogen, peroksida dan logam – logam. Kromium dapat menyala atau mudah menyala, dapat terbakar secara spontan apabila terpapar di udara atau bila debu kromium bercampur dengan udara dapat terbakar atau meledak.

#### **D. *Escherichia coli***

*Escherichia coli*, atau biasa disingkat *E. coli*, adalah salah satu jenis [spesies](#) utama [bakteri gram negatif](#). Pada umumnya, bakteri yang ditemukan oleh [Theodor Escherich](#) ini dapat ditemukan dalam [usus besar manusia](#). Kebanyakan



*Escherichia coli* tidak berbahaya, tetapi beberapa, seperti *Escherichia coli* tipe [O157:H7](#), dapat mengakibatkan keracunan makanan yang serius pada manusia yaitu [diare](#) berdarah karena [eksotoksin](#) yang dihasilkan bernama [verotoksin](#). Toksin ini bekerja dengan cara menghilangkan satu basa [adenin](#) dari unit 28S [RNA](#), sehingga menghentikan sintesis [protein](#). Sumber bakteri ini contohnya adalah daging yang belum masak, seperti daging hamburger yang belum matang.

*Escherichia coli* yang tidak berbahaya dapat menguntungkan manusia dengan memproduksi [vitamin K<sub>2</sub>](#), atau dengan mencegah bakteri lain di dalam usus. *Escherichia coli* banyak digunakan dalam teknologi [rekayasa genetika](#). Biasa digunakan sebagai [vektor](#) untuk menyisipkan [gen-gen](#) tertentu yang diinginkan untuk dikembangkan. *Escherichia coli* dipilih karena pertumbuhannya sangat cepat dan mudah dalam penanganannya.



Gambar 2.4. Bakteri *Escherichia coli*

*Escherichia coli* merupakan bakteri berbentuk batang dengan panjang sekitar 2 micrometer dan diameter 0.5 micrometer. Volume sel *Escherichia coli* berkisar 0.6-0.7 micrometer kubik. *Escherichia coli* tidak dapat memproduksi H<sub>2</sub>S, tetapi dapat membentuk gas dari glukosa, menghasilkan tes positif terhadap indol, dan memfermentasikan laktosa. Bakteri ini dapat tumbuh baik pada suhu antara 8° C- 46° C, dengan suhu optimum dibawah temperature 37<sup>0</sup> C. Bakteri ini berada dibawah temperature minimum atau sedikit diatas temperature maksimum tidak segera mati, melainkan berada dalam keadaan dormancy, disamping itu *Escherichia coli* dapat tumbuh pada pH optimum berkisar 7,2-7,6 (Dwidjoseputro D. 1998; Gani A. 2003)

### **E. *Pseudomonas putida***

Salah satu bakteri yang banyak digunakan sebagai biomaterial dalam berbagai penelitian biosorpsi adalah genus *Pseudomonas* seperti spesies *Pseudomonas sp* mampu menyerap logam krom (VI) dan kadmium (Cd), *aeruginosa* untuk logam tembaga (Cu), kadmium (Cd) dan timbal (Pb). *Pseudomonas putida*, logam kadmium (Cd), tembaga (Cu), timbal (Pb), seng (Zn), logam krom (VI) dan kadmium (Cd). *Pseudomonas stutzeri*, logam tembaga (Cu). Kondisi proses biosorpsi, pH mendekati netral (4 - 7) dan waktu kontak mulai 1 jam hingga 24 jam (Vijayaraghavan et. al., 2008).

Bakteri *Pseudomonas* sendiri memiliki karakteristik seperti, gram negatif, berbentuk batang (rods) atau kokus (coccus), aerob obligat, motil mempunyai flagel polar. Bakteri ini, oksidase positif, katalase positif, nonfermenter dan tumbuh dengan baik pada suhu 4°C atau dibawah 43 °C. *Pseudomonas* banyak ditemukan pada tanah, tanaman dan air. Beberapa spesies *Pseudomonas* seperti *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas sp*, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas syringae*, *Pseudomonas stutzeri* dan lain-lain.



Gambar 2.5. Bakteri *Pseudomonas putida*

### **F. Pertumbuhan Mikroorganisme**

Pertumbuhan adalah peningkatan jumlah semua komponen dari suatu organisme secara teratur. Pertumbuhan didefinisikan sebagai pertambahan kuantitas konstituen seluler dan struktur organisme yang dapat dinyatakan dengan ukuran, diikuti dengan pertambahan jumlah, pertambahan ukuran sel,

pertambahan berat atau massa. Pada organism uniseluler pertumbuhan lebih diartikan sebagai pertumbuhan koloni, yaitu pertambahan jumlah koloni, ukuran koloni yang semakin besar, substansi atau massa mikroba dalam koloni tersebut semakin banyak (Aguskrisno, 2011).

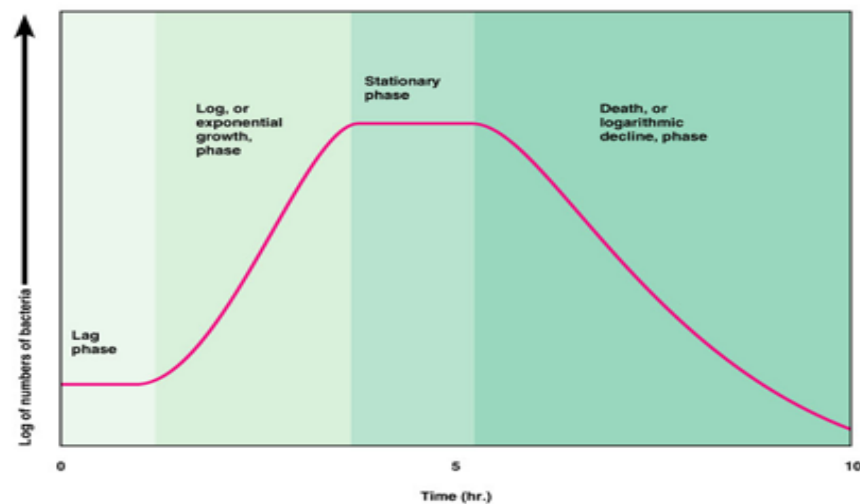
Perkembangbiakan mikroorganisme dapat terjadi secara seksual dan aseksual. Yang paling banyak terjadi adalah perkembangbiakan aseksual. Pemiakan aseksual terjadi dengan pembelahan biner, yakni satu sel induk membelah menjadi dua sel anak. Kemudian masing-masing sel anak membentuk dua sel anak lagi dan seterusnya. Tipe lain cara perkembangbiakan aseksual disamping pembelahan biner adalah pembelahan ganda dan perkuncupan. Reproduksi bakteri terjadi secara pembelahan biner. Perbanyak sel dengan cara ini, kecepatan pembelahan sel ditentukan dengan waktu generasi. Waktu generasi adalah waktu yang dibutuhkan oleh sel untuk membelah bervariasi tergantung dari spesies dan kondisi pertumbuhan. Pembelahan biner yang terjadi pada bakteri adalah pembelahan biner melintang yaitu suatu proses reproduksi aseksual, setelah pembentukan dinding sel melintang, maka satu sel tunggal membelah menjadi dua sel yang disebut dengan sel anak.

Reproduksi pada khamir, misalnya *saccharomyces* tipe pembelahan selnya ada yang seperti bakteri, yakni dengan pembelahan biner, tetapi ada yang membentuk kuncup, dimana tiap kuncup akan membesar seperti induknya. Kemudian tumbuh kuncup baru dan seterusnya, sehingga akhirnya membentuk semacam mata rantai. Tipe yang ketiga cara perkembangbiakan khamir adalah dengan pembelahan tunas, yakni kombinasi antara pertunasan dan pembelahan. Sedangkan cara keempat dengan sporulasi atau pembentukan spora, yang dapat dibedakan atas dua macam yaitu spora seksual dan aseksual.

Reproduksi dengan cara pertunasan, pembelahan, pembelahan tunas, dan pembentukan spora aseksual disebut sebagai reproduksi vegetatif, sedangkan reproduksi dengan cara membentuk spora seksual dinamakan reproduksi seksual. Perkembangbiakan secara seksual, umumnya terjadi pada jamur dan mikroalga, serta secara terbatas terjadi pada bakteri, dapat terjadi secara:

- Oogami, bila sel betina berbentuk telur
- Anisogami, bila sel betina lebih besar dari sel jantan
- Isogami, bila sel jantan dan sel betina mempunyai bentuk yang sama.

(Lestari, 1986)



Gambar 2.6. Grafik pertumbuhan mikroba dalam biakan sistem tertutup

Berdasarkan kurva pertumbuhan, mikroorganisme mengalami beberapa fase pertumbuhan diantaranya adalah fase lag, fase eksponensial, fase stasioner dan fase kematian. Seperti yang terlihat pada gambar 2.6.

1. Fase lag adalah kondisi bakteri baru saja diinokulasi atau dibiakkan dalam medium. Pada fase ini bakteri lebih melakukan adaptasi dengan lingkungan.
2. Fase eksponensial dimana bakteri melakukan pembelahan secara biner dengan jumlah kelipatan (eksponensial). Selama fase ini, metabolisme sel paling aktif dan sintesis bahan sel terjadi dengan cepat
3. Fase stasioner dimana bakteri sudah tidak melakukan pembelahan lagi. Pada fase stasioner, jumlah sel yang mati semakin meningkat sehingga jumlah sel hidup hasil pembelahan sama dengan jumlah sel yang mati. Fase ini dapat disebut juga *lack of biological space*
4. Fase kematian dimana terjadi pengurangan jumlah bakteri yang hidup. Pada fase ini ditandai dengan jumlah sel yang mati lebih banyak daripada sel yang

hidup karena nutrien semakin menurun, energi cadangan di dalam sel juga habis dan terkumpulnya produk limbah.

(Novitasari, 2011)

### **BAB III**

#### **Metodelogi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada bulan Oktober 2016 – Juni 2017. Penelitian yang dilaksanakan meliputi : 1) Perancangan reaktor microbial fuel cell, 2) Persiapan bakteri, 3) Persiapan reagen di katoda 4) Proses bio-listrik pada microbial fuel cell 5) Analisa pH, konsentrasi Cr(VI), BOD (*biochemical oxygen demand*), COD (*chemical oxygen demand*) dan produksi listrik

#### **A. Variabel Penelitian**

##### **1. Kondisi Operasi**

- Suhu = 20 – 30°C
- tekanan = 1 atm
- Waktu = 10 hari
- Elektroda = grafit (karbon aktif)  
1,17 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>
- pH pada larutan anoda = 6 s/d 7
- Larutan Cr (VI) = 18 mg/L

##### **2. Variabel Percobaan**

- Jenis bakteri = *Escherichia coli*  
*Pseudomodas putida*
- pH pada larutan katoda = 3,4 dan 5
- Konsentrasi bakteri = 12,5%; 15%; dan 17,5% (v/v)  
Dengan populasi bakteri 10<sup>9</sup> sel/ml

## B. Bahan, Alat dan Skema Alat Penelitian

### 1. Bahan Penelitian

Bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah:

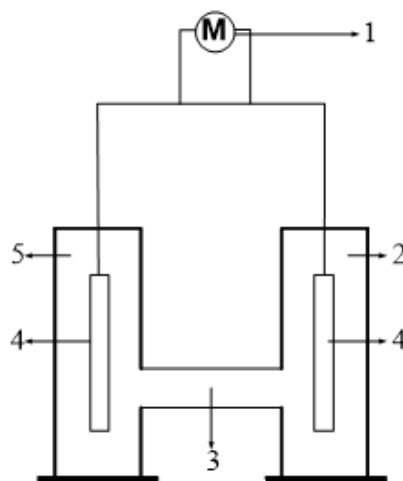
- Aquadest
- Biakan bakteri *Escherichia coli*
- Biakan bakteri *Pseudomonas putida*
- Padatan kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ )
- Padatan difenil karbazid
- Padatan kalium klorida (KCl)
- agar

### 2. Alat Penelitian

Alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah:

- *counting chamber*
- Rak tabung reaksi dan tabung reaksi
- Pipet tetes
- Erlenmeyer,
- gelas beker,
- gelas ukur
- autoclave
- pH meter,
- pipet volume
- thermometer
- Sanwa CD800A Digital Multimeter (voltmeter dan ampermeter)

### 3. Skema Alat Penelitian

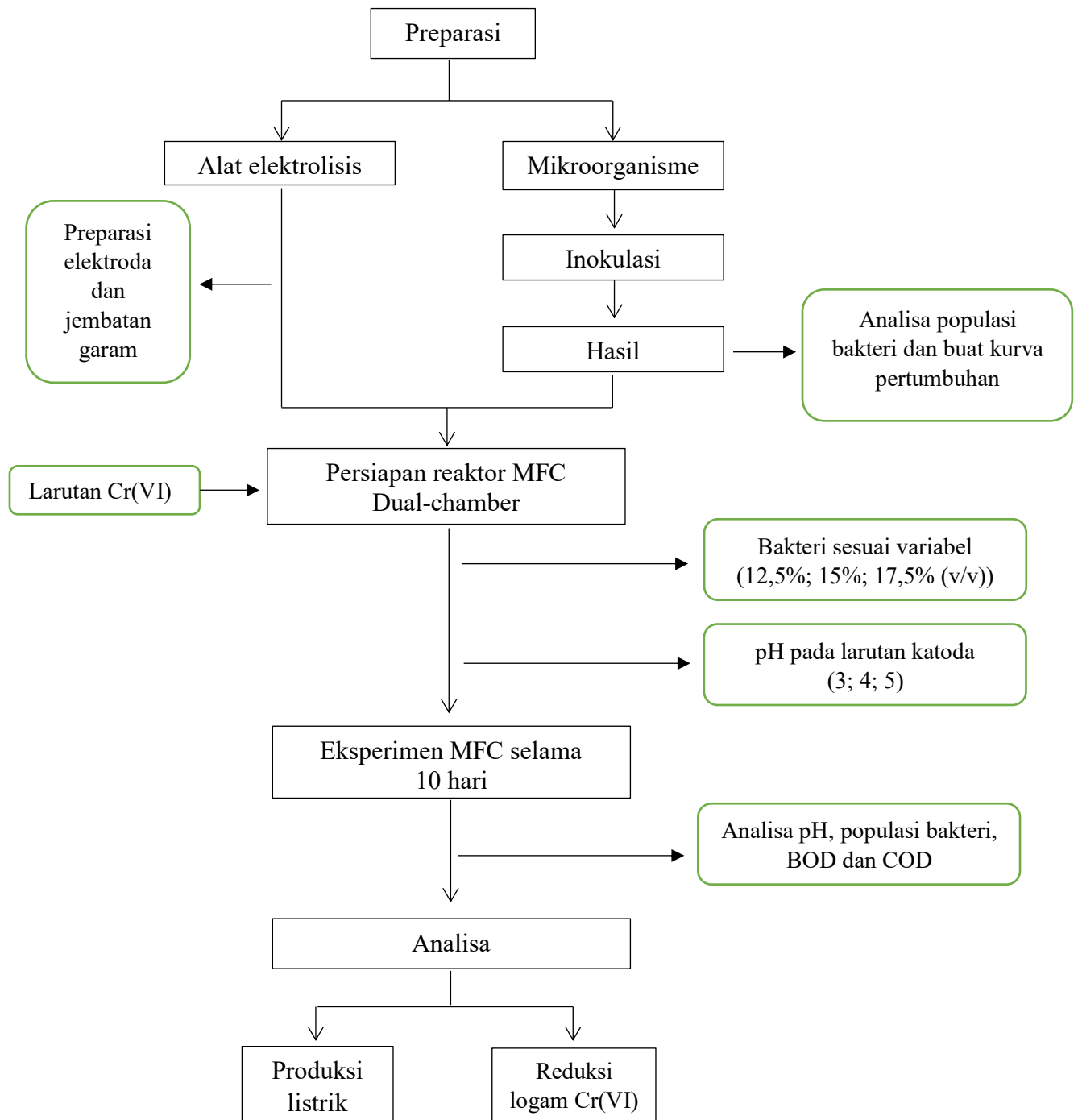


Keterangan gambar :

1. Multimeter (voltmeter/ampermeter)
2. Ruang anoda (bakteri)
3. Jembatan garam
4. Elektroda
5. Ruang katoda (larutan  $Cr(VI)$ )

Gambar 3.1 Rangkaian alat *microbial fuel cells*

### C. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir *microbial fuel cells*



## **D. Tahapan Penelitian**

### **1. Persiapan Penelitian**

#### **a. Pembuatan larutan Cr(VI)**

Larutan Cr(VI) 18 mg/L dibuat dengan melarutkan kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) yang telah ditimbang secara kuantitas.

#### **b. Preparasi Elektroda**

Elektroda karbon direndam ke dalam larutan HCl 1 M selama 1 hari kemudian dibilas dengan menggunakan aquades. Setelah itu elektroda direndam lagi ke dalam larutan NaOH 1 M selama 1 hari kemudian lagi dengan menggunakan aquades. Elektroda direndam dalam larutan aquades hingga saat akan digunakan (Novitasari, 2011)

#### **c. Preparasi jembatan garam**

Larutkan 5 gram agar dalam 100 ml air, kemudian tambahkan 7,45 gram kalium klorida. Dipanaskan hingga mendidih, setelah itu dinginkan. Kemudian masukan cairan agar tersebut kedalam pipa, tunggu hingga agar padat (Shopia, 2016)

### **2. Proses eksperimen**

#### **a. Proses eksperimen *microbial fuel cells***

- 1) Ruang katoda dan anoda dipisahkan menggunakan jembatan garam seperti pada gambar 3.1. Jembatan garam yang digunakan terbuat dari 1M KCl dalam 5% agar.
- 2) Ruang katoda diisi dengan larutan Cr (VI) dan pada ruang anoda diisi dengan mikroorganisme.
- 3) Kemudian elektroda dipasang di masing-masing ruang dan dihubungkan dengan rangkaian kabel seperti pada gambar 3.1
- 4) Diamati nilai arus listrik dan tegangan yang tertera pada layar digital multimeter hingga stabil dan dicatat.

**b. Pengambilan sampel**

Pengambilan sample dilakukan per 24 jam kemudian di analisa produksi listrik, pH dan populasi bakterinya.

**3. Tahap Analisa Proses**

**a. Analisa pH**

Pengukuran pH menggunakan pH meter

Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan thermometer alkohol yang dimasukkan ke dalam ruang katoda dan anoda.

**b. Analisa produksi listrik**

Multimeter digital dihubung pada kedua elektroda, dengan kutub positif di katoda dan kutub negatif di ruang anoda. Pembacaan tegangan dan arus listrik dicatat setiap 24 jam. Dari data kuat arus dan tegangan, dapat diperoleh nilai *power density* ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ), yaitu daya per satuan luas permukaan elektroda. *Power density* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Momoh et al, 2010)

$$\text{Power density (mW/m}^2\text{)} = \frac{I \text{ (mA)} \times V \text{ (Volt)}}{A \text{ (m}^2\text{)}}$$

Dimana I sebagai kuat arus, V sebagai beda potensial dan A adalah luas permukaan elektroda.

**c. Analisa Reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) (ASTM D 1687-92)**

1) Pembuatan larutan pengompleks Diphenylcarbazide

Diambil 0,25 gram larutan pengompleks lalu diencerkan dengan asetone 100ml (metode ASTM)

2) Larutan pereaksi  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (1+1)

Diambil 25 mL larutan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  pekat 85 % lalu diencerkan dengan akuades sampai tanda batas dengan labu ukur 50 mL.

3) Larutan Pereaksi Cr

- a) Larutan pereaksi Cr 500 ppm sebagai larutan induk. Dilarutkan 0,1414 gram  $K_2Cr_2O_7$  dalam akuades, diencerkan dengan akuades sampai tanda batas dengan labu ukur 500 mL.
- b) Larutan pereaksi Cr 5 ppm. Diambil 1 mL larutan pereaksi dan diencerkan dengan akuades sampai tanda batas dengan labu ukur 100 mL.
- c) Larutan pereaksi Cr 1 ppm. Diambil 20 mL larutan pereaksi dan diencerkan dengan akuades sampai tanda batas dengan labu ukur 100 mL.

4) Larutan pereaksi  $H_2SO_4$  0,938 M

Diambil 2,5 mL larutan  $H_2SO_4$  pekat 18,76M lalu diencerkan dengan akuades sampai tanda batas dengan labu ukur 50 mL.

5) Perlakuan pra cuplikan untuk metode ASTM D 1687-92

Sampel disaring kemudian pH diatur antara 8 sampai 8,5, jika lebih besar dari 8,5 ditambahkan beberapa tetes  $H_3PO_4$  (1+19).

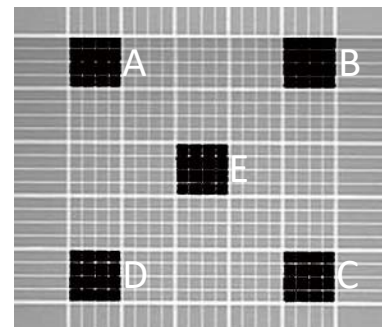
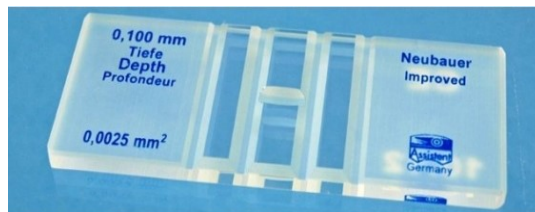
6) Pembuatan Kurva Kalibrasi

Diambil 1 mL, 2 mL, 3 mL, 4 mL, dan 5 mL larutan  $K_2Cr_2O_7$  1 ppm, ditempatkan dalam 5 labu ukur 100 mL. Kemudian diencerkan dengan akuades sampai tanda batas. Masing-masing larutan diambil 50 mL. Dari larutan yang masih ada kemudian masing-masing ditambahkan dengan 2 mL larutan diphenylcarbazide lalu diaduk dengan cara dibalikkan sebanyak 6 kali. Kemudian ditambahkan 5,0 mL  $H_3PO_4$  1+1. Larutan didiamkan hingga 15 menit kemudian larutan diukur serapannya 30 menit setelah dicampurkan dengan pengompleks pada panjang gelombang 540 nm. Diperoleh kurva antara absorbansi kompleks versus konsentrasi Cr(VI)

**d. Analisa Populasi bakteri**

Analisa populasi bakteri menggunakan *haemocytometer* dengan prosedur sebagai berikut:

- 1) Diencerkan 0,1 mL sampel dengan aquades 9,9 mL (pengenceran 100 kali)
- 2) Teteskan ke permukaan *counting chamber* hingga dapat menutupi seluruh permukaannya.
- 3) Letakkan *haemocytometer* dibawah lensa mikroskop untuk dihitung jumlah selnya.
- 4) Dilakukan pengamatan di mikroskop dengan perbesaran 400 kali



Gambar 3.3 Hemasitometer (*Counting Chamber*)

**e. Analisa COD**

1. Masing-masing kuvet yang berisi sampel dan blanko ditambahkan Kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) 0,25 N sebanyak 2 ml.
2. Dikocok lalu dimasukkan ke dalam COD reaktor selama 2 jam.
3. Dilakukan pembacaan pada DR 2000 setelah 2 jam.
4. Catat pembacaan.

### E. Rencana Jadwal Kegiatan

Tabel 3.1. Rencana dan Jadwal Kegiatan Penelitian Tahun 2016-2017

No	Kegiatan	Sep- Okt	Nov- Des	Jan- Feb	Mar- April	Mei- Juni	Juli- Agst
1	Studi Literatur						
2	Persiapan Bahan dan Rangkai Alat						
3	Penelitian						
4	Analisis Hasil Eksperimen						
5	Seminar Internasional						
6	Pengerjaan Laporan						

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Reaktor *Microbial fuel cell*

Reaktor yang digunakan pada penelitian ini merupakan reaktor *microbial fuel cell* dengan sistem *dual-chamber*. Terdapat dua ruang pada reaktor ini, yaitu ruang katoda dan ruang anoda. Pada ruang anoda berisikan limbah domestik (steril), 1,28 mg/L Natrium asetat dan bakteri (Sun, 2015), pada ruang katoda berisikan larutan kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) dengan konsentrasi 18 mg/L. Dalam banyak penelitian tentang *microbial fuel cell*, asetat umum digunakan sebagai substrat untuk bakteri agar dapat menghasilkan listrik. Senyawa kimia ini lebih mudah diproses oleh bakteri. Asetat tergolong senyawa kimia sederhana yang berfungsi sebagai sumber karbon untuk bakteri. Kelebihan lain dari asetat adalah senyawa ini tidak menimbulkan reaksi lain terhadap bakteri seperti fermentasi dan methanogenesis pada temperatur ruang (Fikri, 2011). Volume pada masing-masing ruang adalah 800 mL. Setiap ruangnya dipasang sebuah elektroda. Antara ruang anoda dan ruang katoda dihubungkan dengan jembatan garam.

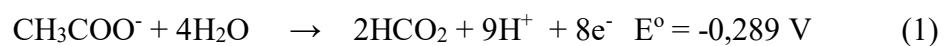


Gambar 4.1. Reaktor *Microbial fuel cell*

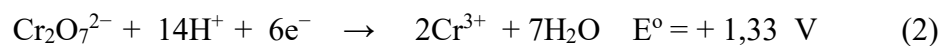
Elektroda yang digunakan adalah elektroda grafit, dengan luas permukaan  $1,175 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Sebelum digunakan, elektroda ini terlebih dahulu direndam dalam HCL 1 M dan NaOH 1 M, kemudian elektroda disimpan dalam aquades sampai akan digunakan. Hal ini bertujuan untuk meregenerasi elektroda dan menghilangkan kontaminasi logam dan bahan organik (Chae *et*

al, 2008). Jembatan garam yang digunakan adalah KCl 1M dalam 5% agar, jembatan garam pada reaktor ini digunakan sebagai membran tempat proton berdifusi dari ruang anoda ke ruang anoda. Sedangkan elektron tidak dapat berdifusi melalui membran ini.

Prinsip kerja reaktor *microbial fuel cell* pada penelitian ini, elektron ( $e^-$ ) dan proton ( $H^+$ ) yang dihasilkan dari ruang anoda adalah hasil degradasi senyawa organik dari proses metabolisme mikroorganisme, dengan persamaan reaksi, sebagai berikut:



Kemudian elektron ( $e^-$ ) tersebut berpindah dari ruang anoda ke ruang katoda melalui elektroda dan kabel eksternal yang saling berhubungan. Untuk menyeimbangkan pergerakan elektron, proton ( $H^+$ ) juga berpindah dari ruang anoda ke ruang katoda melalui membran pertukaran kation yang berupa jembatan garam. Elektron yang ada pada ruang katoda akan bereaksi dengan Cr (VI) dengan persamaan reaksi, sebagai berikut:



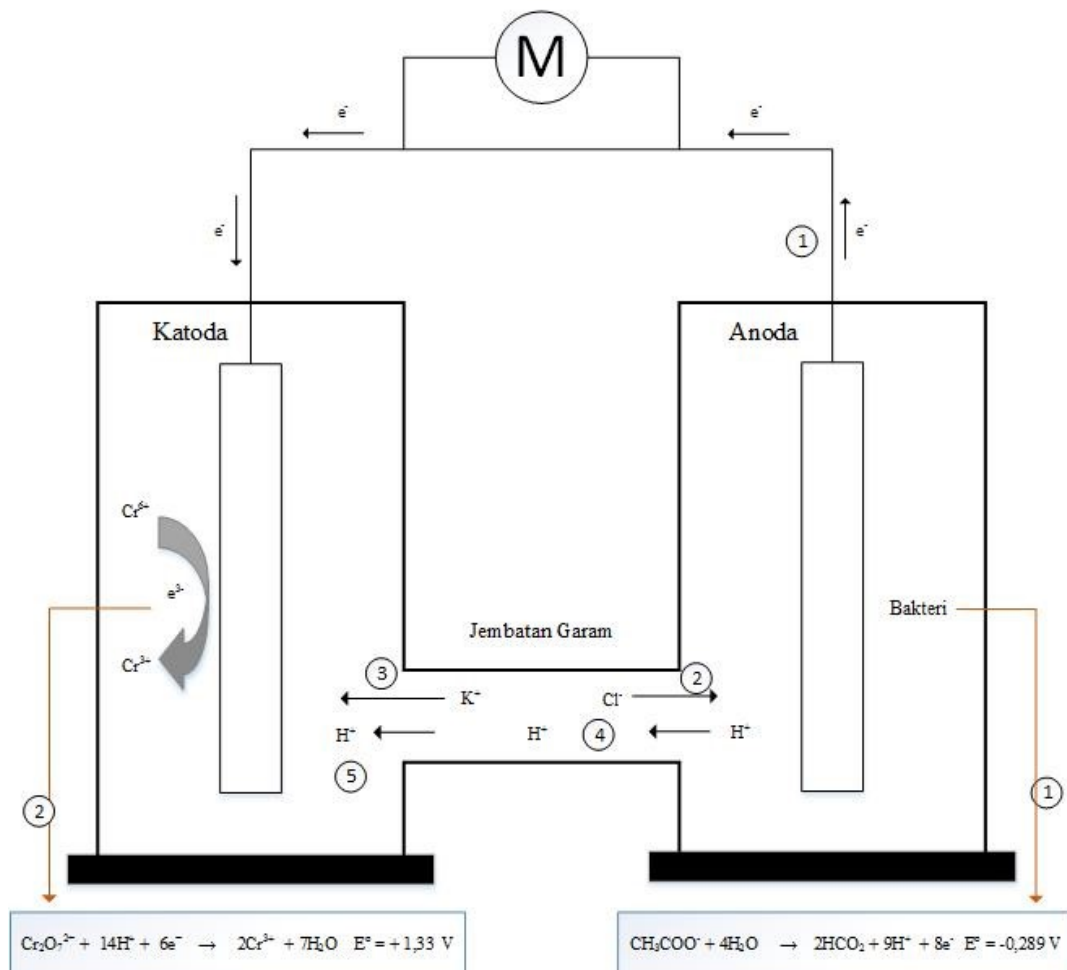
Karena ada pergerakan elektron ( $e^-$ ) dan proton ( $H^+$ ) dari ruang anoda ke ruang katoda maka menghasilkan perbedaan potensial listrik, sehingga dapat menghasilkan energi bio-listrik. Reduksi ion logam Cr(VI) menjadi ion logam Cr(III) pun terjadi karena adanya perpindahan proton dan elektron tersebut (Xafenias *et al*, 2015)

Mekanisme perpindahan proton dan elektron pada reaktor microbial fuel cell berdasarkan prinsip kerja pada sel volta. Saat ruang anoda dengan ruang katoda dihubungkan dengan jembatan garam. Jembatan garam berfungsi untuk menjaga kenetralan muatan listrik pada larutan. Karena konsentrasi larutan elektrolit pada jembatan garam lebih tinggi daripada konsentrasi elektrolit di kedua bagian elektroda, maka ion negatif dari jembatan garam masuk ke salah satu setengah sel yang kelebihan muatan positif dan ion positif dari jembatan garam berdifusi ke bagian lain yang kelebihan muatan negatif. Dengan mekanisme reaksi (gambar 4.2):

1. Saat bakteri bermetabolisme, bakteri akan mengurai substrat dan menghasilkan elektron dan proton. Elektron yang dihasilkan akan bergerak

dari ruang anoda ke ruang katoda karena adanya perbedaan beda potensial elektrode.

- Elektron yang berada pada katoda akan bereaksi dengan ion kompleks, yakni ion dikromat. Ion dikromat tersebut tereduksi menjadi ion  $\text{Cr}^{3+}$ . Pada anoda terjadi penurunan ion  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  maka untuk menyeimbangkan, ion  $\text{Cl}^-$  dari jembatan garam masuk ke ruang anoda.
- Sebaliknya ion  $\text{K}^+$  akan masuk ke ruang katoda untuk mengimbangkan kadar ion dikromat yang turun.
- Karena ion  $\text{K}^+$  yang bergerak ke ruang katoda, maka ion  $\text{H}^+$  dari ruang anoda bergerak ke jembatan garam untuk menggantikan ion  $\text{K}^+$ .
- Ion  $\text{H}^+$  tersebut kemudian bergerak ke arah ruang katoda.



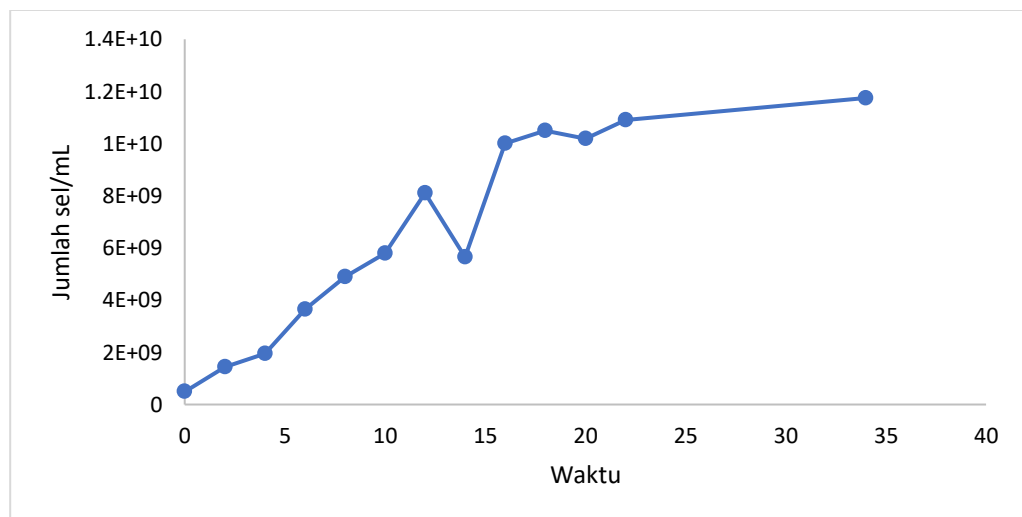
Gambar 4.2. Mekanisme pergerakan elektron dan proton pada reaktor *microbial fuel cell*



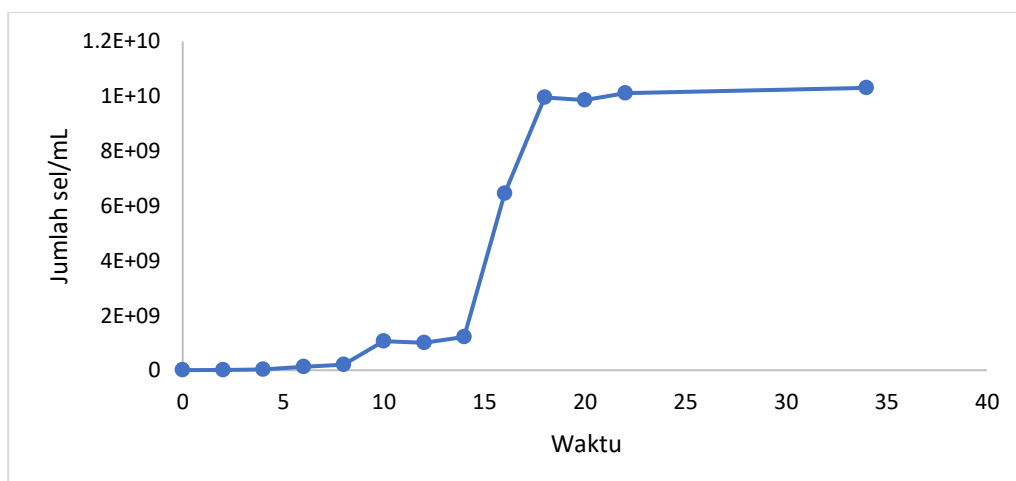
## B. Pertumbuhan Bakteri

Pada penelitian ini menggunakan jenis bakteri *Escherichia coli* dan *Pseudomonas putida*. Fase log pertumbuhan bakteri *Escherichia coli* (gambar 4.2) terjadi pada 6 sampai 10 jam dan untuk fase log bakteri *Pseudomonas putida* (gambar 4.3) terjadi pada 14 sampai 18 jam.

Pada penelitian ini digunakan fase log bakteri sebagai waktu awal, karena pada fase ini metabolisme sel bakteri paling aktif. Dengan aktifnya bakteri bermetabolisme, diharapkan banyak elektron ( $e^-$ ) dan proton ( $H^+$ ) yang dihasilkan sehingga produksi bio-listrik pun akan semakin meningkat.



Gambar 4.3. Pertumbuhan Bakteri *Escherichia coli*

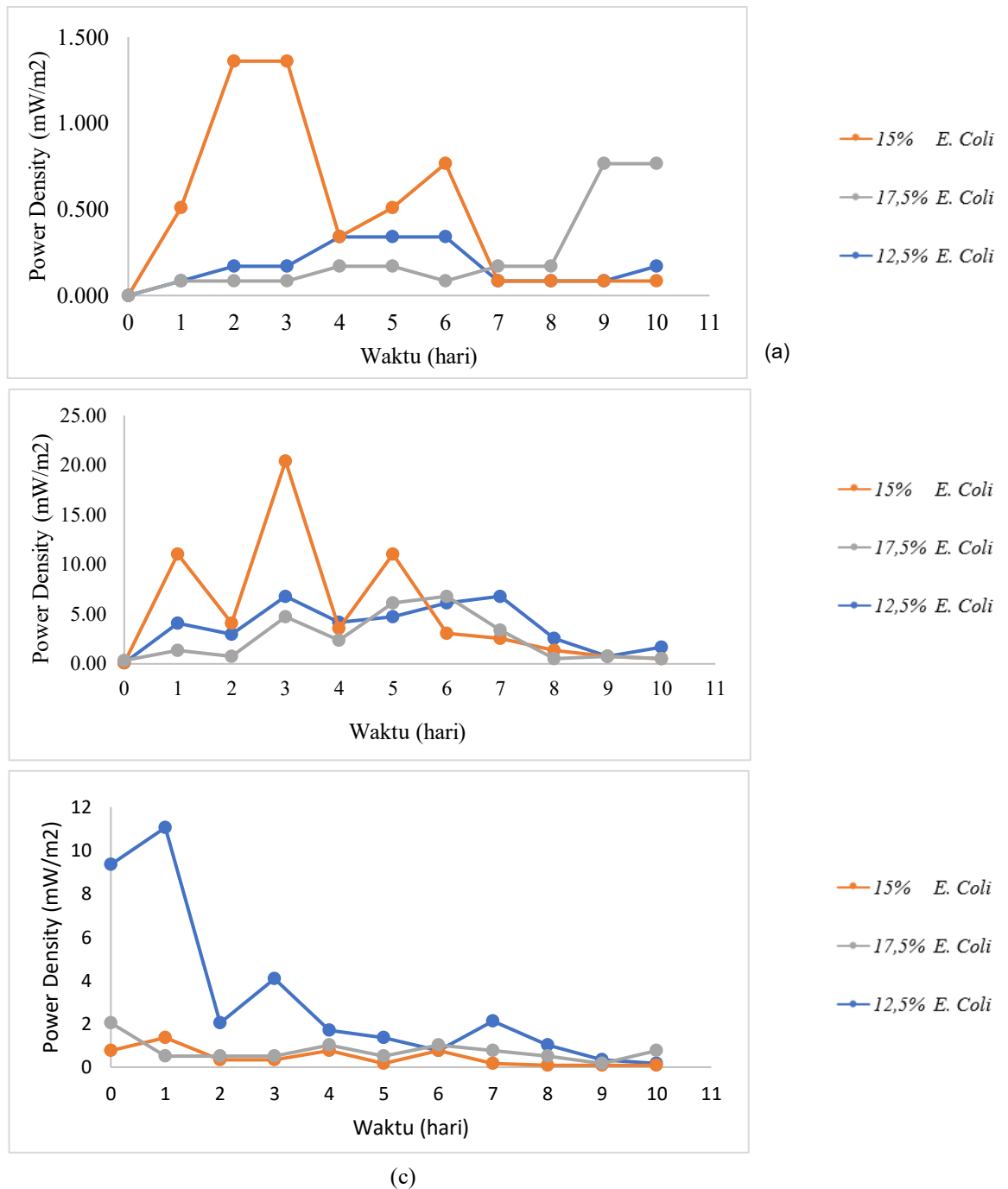


Gambar 4.4. Pertumbuhan Bakteri *Pseudomonas putida*

### C. Produksi Listrik dengan bakteri *Escherichia coli* pada ruang anoda

Variabel penelitian pada proses ini adalah pH larutan pada ruang katoda dan jenis bakteri serta konsentrasi awal bakteri yang digunakan pada ruang anoda. Penelitian yang telah dilakukan menggunakan jenis bakteri *Escherichia coli* dengan variasi konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5% (v/v).

Salah satu tujuan dari penelitian ini untuk meninjau pengaruh konsentrasi awal bakteri dan pH diruang katoda terhadap produksi bio-listrik dan melihat kinerja maksimum reaktor *microbial fuel cell*.

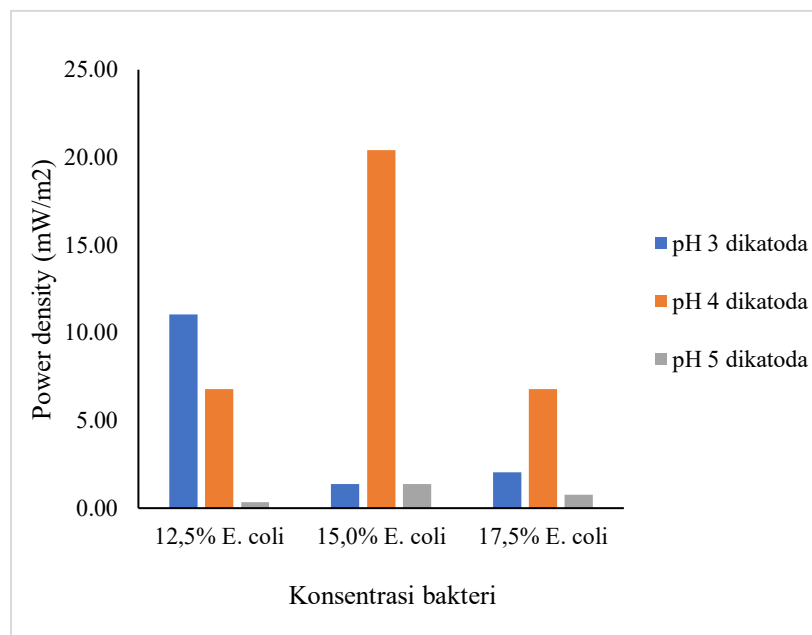


Gambar 4.5. Nilai *Power density* dengan variasi (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3

Menurut Jadhav G.S (2009) kinerja reaktor dipengaruhi beberapa faktor, antara lain laju konversi dari substrat, membran penukar ion, internal dan

eksternal hambatan dalam sel serta beda potensial antara anoda dan katoda. Substrat sangat penting dalam proses ini, karena substrat menjadi sumber karbon dan sumber energi dari mikroorganisme.

Besarnya produksi listrik dalam reaktor *microbial fuel cell* dipengaruhi oleh laju metabolisme yang dilakukan oleh bakteri. Berdasarkan gambar 4.5.(a), 4.5.(b), 4.5.(c) hasil power density bio-listrik untuk berbagai variable konsentrasi bakteri diperoleh nilai maksimum sebesar 20,41 mW/m<sup>2</sup> pada variasi konsentrasi bakteri sebesar 15% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda sebesar pH 4. Dari hasil ini dapat dikatakan konsentrasi awal bakteri yang paling baik dalam menghasilkan bio-listrik adalah 15%.

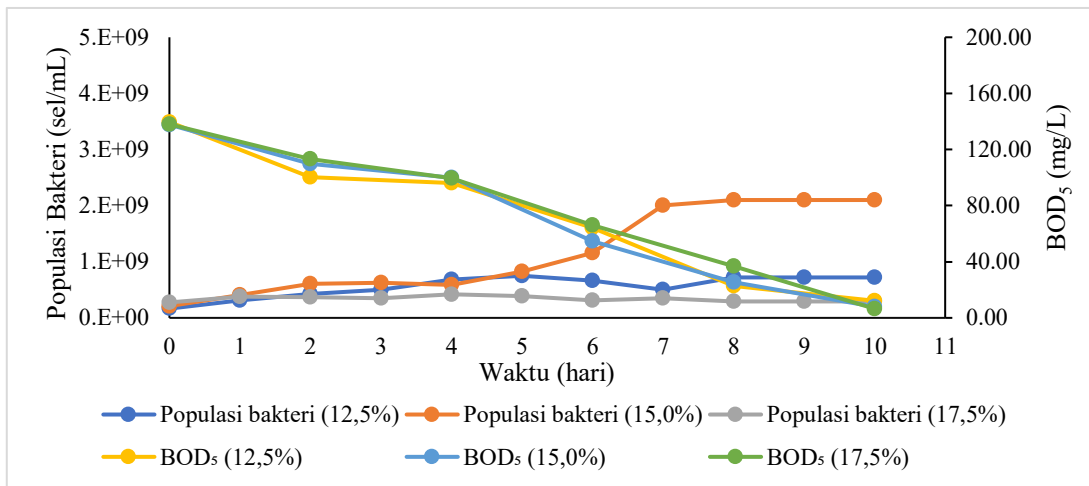


Gambar 4.6 Hubungan *power density* terhadap konsentrasi awal bakteri

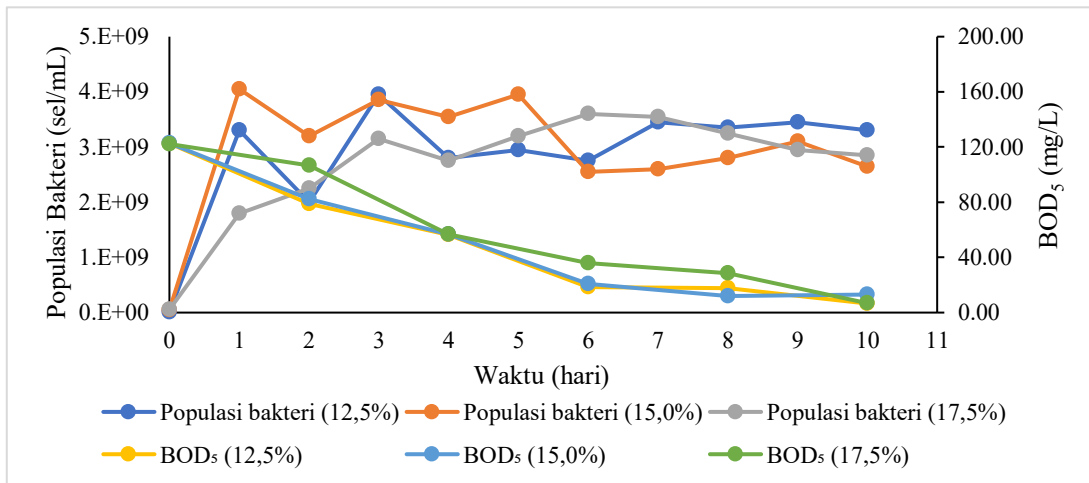
Bertambahnya jumlah sel bakteri memungkinkan semakin banyak proton dan elektron yang dapat dihasilkan dari proses metabolisme, sehingga produksi bio-listrik yang dihasilkan akan semakin tinggi. Akan tetapi jumlah substrat di anoda semakin hari semakin berkurang karena volume reaktor yang tetap dan tidak ada tambahan sumber karbon dan nutrien, hal ini menyebabkan terjadinya perebutan makanan diantara sel bakteri. Karena tidak semua sel bakteri dapat melakukan metabolisme secara maksimum, sehingga menyebabkan menurunnya produksi bio-listrik yang dihasilkan (Januarita dkk, 2015).

Pada awal penelitian produksi listrik yang dihasilkan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan konsentrasi substrat yang masih cukup untuk dikonsumsi bakteri sebagai sumber energi. Terlihat pada gambar 4.7.(a), 4.7.(b), 4.7.(c) “hubungan populasi bakteri terhadap BOD<sub>5</sub> dan waktu”, menunjukkan semakin bertambahnya populasi bakteri maka konsentrasi BOD<sub>5</sub> mengalami penurunan. Semakin bertambahnya populasi bakteri, maka semakin banyak jumlah bahan organik (*biodegradable organics*) yang diurai oleh bakteri.

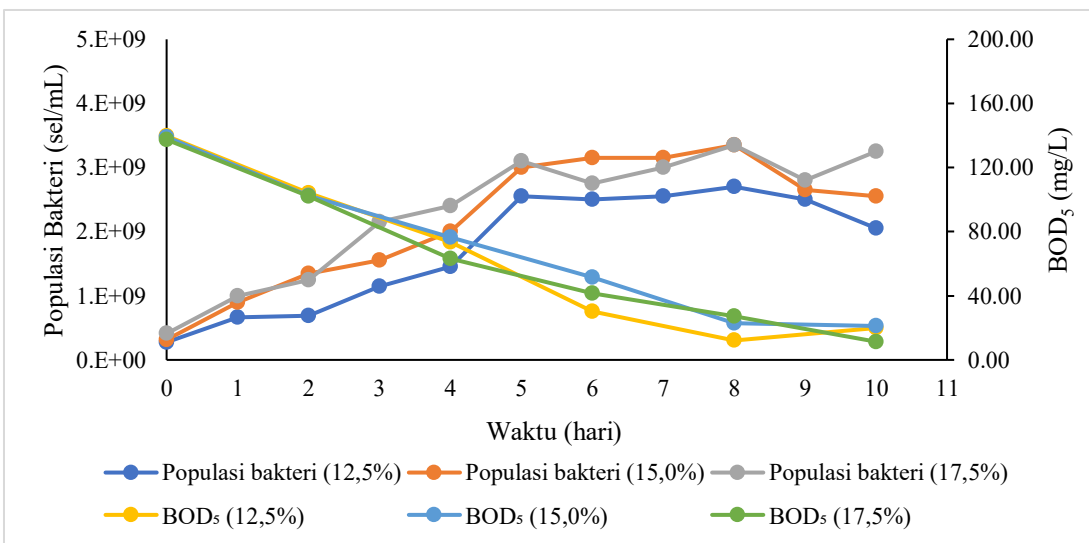
Pada hari ke-10 reaktor *microbial fuel cell* mengalami kecenderungan penurunan produksi listrik, dan hal itu terjadi di semua reactor. Peristiwa ini disebabkan unsur karbon dari substrat mulai berkurang dan ditandai dengan beban konsentrasi BOD<sub>5</sub> pada substrat yang menurun. Hasil metabolisme dari bakteri yaitu elektron (e<sup>-</sup>) dan proton (H<sup>+</sup>) pun menurun, yang berdampak pada produksi bio-listrik juga ikut menurun.



(a)



(b)



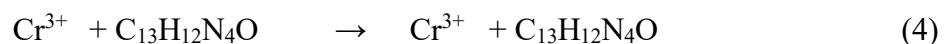
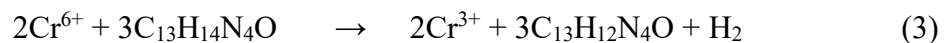
(c)

Gambar 4.7 Hubungan populasi bakteri dengan BOD<sub>5</sub> dengan waktu. Variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3

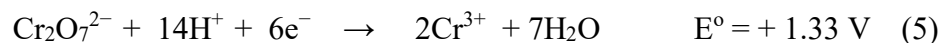
#### D. Reduksi logam Cr<sup>6+</sup> dengan bakteri *Escherichia coli* pada ruang anoda

Variabel penelitian pada proses ini adalah pH larutan pada ruang katoda dan konsentrasi awal bakteri yang digunakan pada ruang anoda. Salah satu tujuan dari penelitian ini untuk meninjau pengaruh penggunaan bakteri *Escherichia coli* dan konsentrasi awal bakteri pada ruang anoda serta pH diruang katoda terhadap reduksi ion logam Cr(VI) menjadi ion logam Cr(III) dengan menggunakan reaktor *microbial fuel cell*.

Menurut Silvia (2009), laju perubahan ion logam Cr(VI) menjadi ion logam Cr(III) tergantung pH. Semakin rendah pH (konsentrasi H<sup>+</sup> tinggi) maka perubahan ion logam Cr(VI) menjadi ion logam Cr(III) semakin besar. Analisis kualitatif yang dilakukan dengan metode pengomplek difenil karbazid dalam suasana asam (ASTM D 1687-92). Apabila terbentuk warna merah keunguan berarti sampel positif mengandung Cr(VI). Adapun reaksi antara Cr(VI) dengan 1,5 difenil karbazid adalah sebagai berikut (Vogel, 1979):



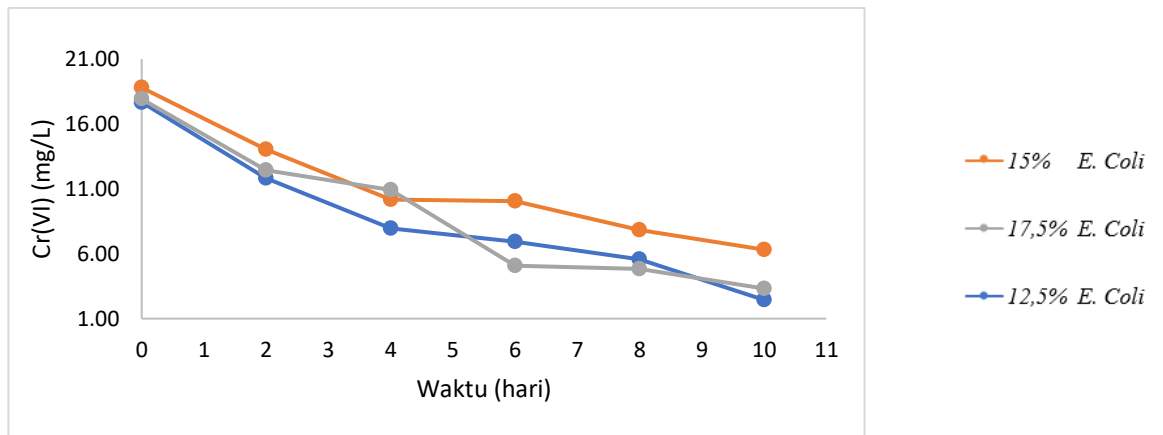
Mikroorganisme di ruang anodik, mengkonsumsi bahan organik dari substrat (air limbah domestik, asetat dan mineral) dan menghasilkan proton (H<sup>+</sup>). Proton ini berdifusi dari ruang anoda ke ruang katoda melalui jembatan garam, sementara elektron (e<sup>-</sup>) mengalir melalui elektroda dan kabel dan menghasilkan bio-listrik. Ion logam Cr (VI) bereaksi dengan elektron tersebut dan mereduksi ion logam Cr (VI) menjadi ion logam Cr (III) seperti pada persamaan di bawah ini:



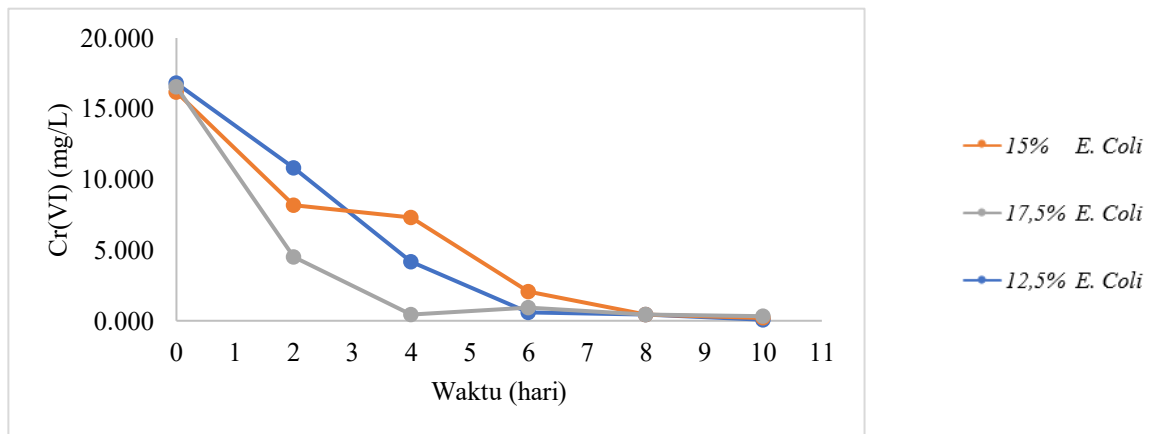
Dari persamaan diatas didapatkan nilai potensial elektroda dari ruang katoda sebesar (E<sup>o</sup>) + 1,33 V. Nilai potensial elektroda ini distandarkan dengan elektrode hydrogen, dimana nilai potensial dari elektroda adalah:



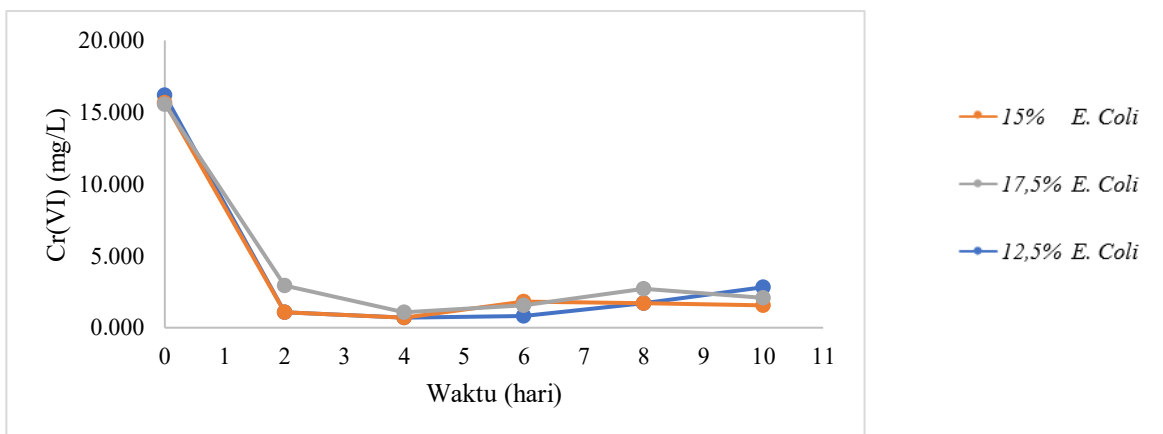
Semakin positif nilai dari E<sup>o</sup> maka nilai potensial elektroda semakin besar, dan kecenderungan zat tersebut untuk tereduksi. (Chang, Raymond, 2010)



(a)



(b)



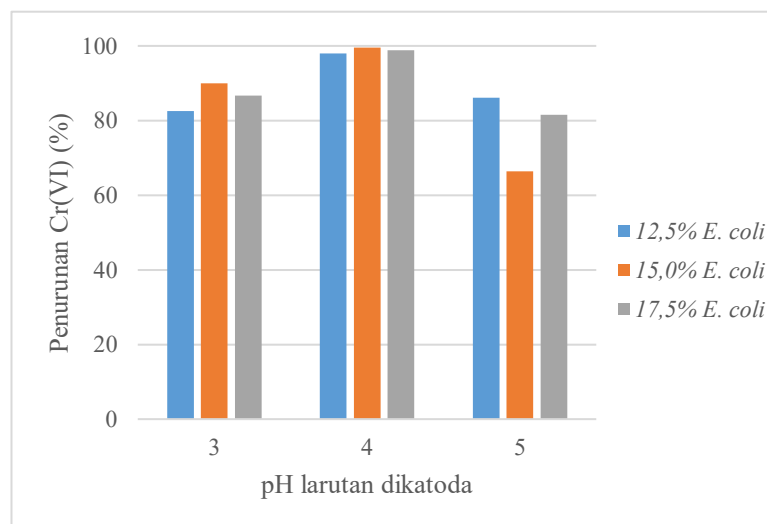
(c)

Gambar 4.8 Konsentrasi Cr(VI) sisa hasil reduksi pada reaktor MFC dengan variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3



Gambar 4.9 menunjukkan penurunan kadar ion logam Cr(VI). Pada variasi pH 5 pada ruang katoda, penurunan konsentrasi ion logam Cr(VI) adalah 86,16%; 66,40%; 81,48% pada konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5%. Pada pH 4 pada ruang katoda, penurunan konsentrasi ion logam Cr(VI) adalah 98,04%; 99,55%; 98,77% pada konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5%. Dan kemudian pada pH 3 pada ruang katoda, penurunan konsentrasi ion logam Cr(VI) adalah 82,56%; 89,97%; 86,68% pada konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5%.

Gambar 4.8.(a), 4.8.(b), 4.8.(c) menunjukkan pada konsentrasi pH 5 dan 4 diruang katoda, ion logam Cr(VI) mengalami penurunan konsentrasi dan penurunan maksimum dari reaksi reduksi ion logam Cr(VI) menjadi ion logam Cr(III) yang dicapai pada pH 4 dan konsentrasi awal bakteri 15%, dari konsentrasi 16,79 mg/L Cr(VI) menjadi 0,075 mg/L Cr(VI). Pada konsentrasi pH 3 konsentrasi ion logam Cr(VI) mengalami penurunan sampai hari ke-4, dan pada hari ke-6 konsentrasi ion logam Cr(VI) mengalami kenaikan lagi. Kemungkinan saat ion logam Cr(VI) mengalami reaksi reduksi ada sebagian ion logam yang terbentuk menjadi ion logam Cr(II), dimana ion logam Cr(II) yang dihasilkan dapat mengalami reaksi oksidasi lagi menjadi ion logam Cr(VI). Hal ini yang menyebabkan konsentrasi ion logam Cr(VI) dalam reaktor mengalami kenaikan.



Gambar 4.9 Hubungan pH larutan dikatoda dengan persen penurunan Cr(VI)

#### E. Produksi Listrik dengan bakteri *Pseudomonas putida* pada ruang anoda

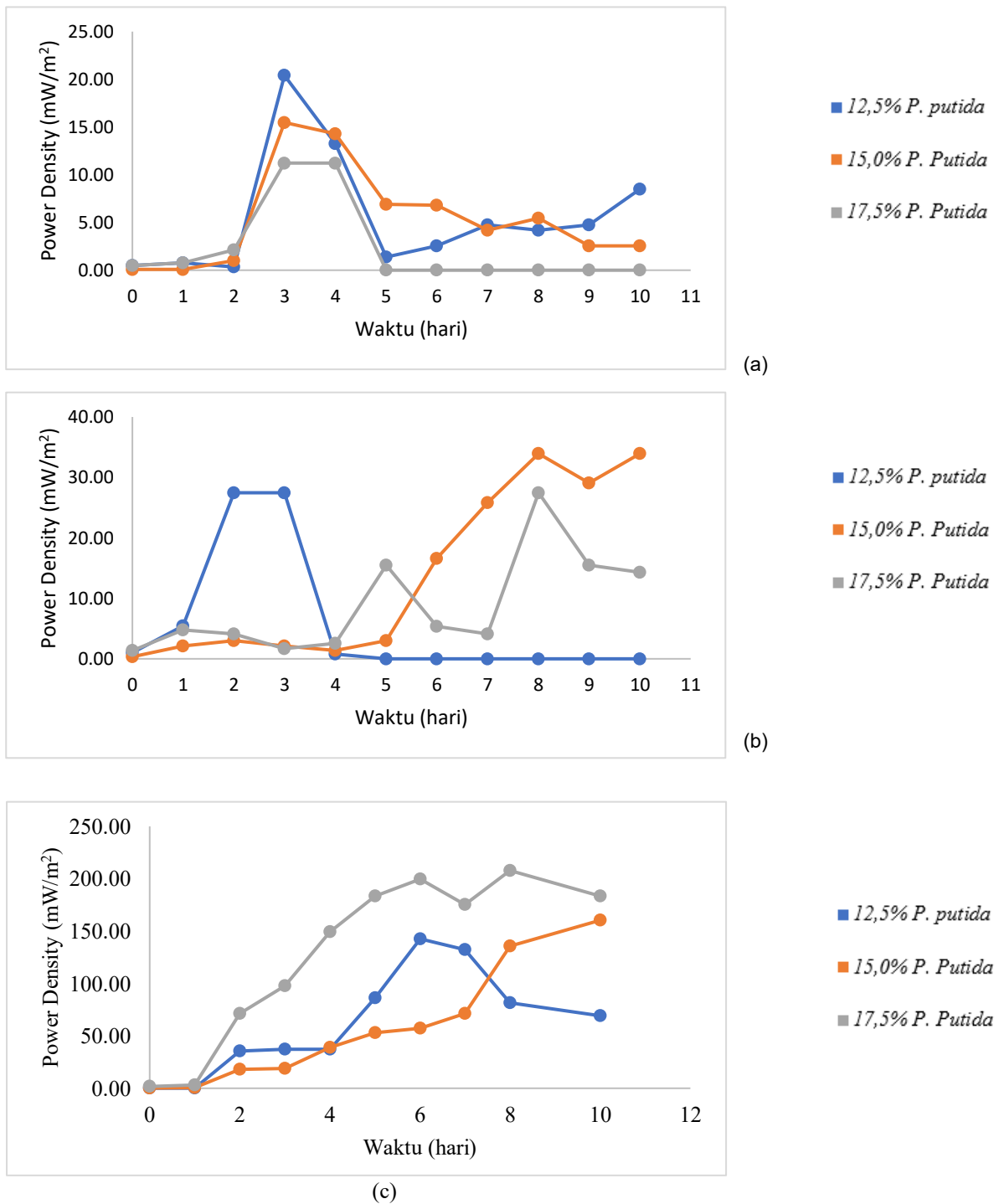
Pada penelitian menggunakan bakteri *Pseudomonas putida* dengan variasi konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5% (v/v) menunjukkan bahwa air limbah domestik dapat diolah dan juga menghasilkan arus listrik selama 10 hari.

Pada awal penelitian produksi listrik yang dihasilkan mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan konsentrasi substrat yang masih cukup untuk dikonsumsi bakteri sebagai sumber energi. Terlihat pada gambar grafik 4.11.(a), 4.11.(b), 4.11.(c) “hubungan populasi bakteri terhadap BOD<sub>5</sub> dan waktu”, menunjukkan semakin bertambahnya populasi bakteri maka konsentrasi BOD<sub>5</sub> mengalami penurunan. Semakin bertambahnya populasi bakteri, maka semakin banyak jumlah bahan organik (*biodegradable organics*) yang diurai oleh bakteri.

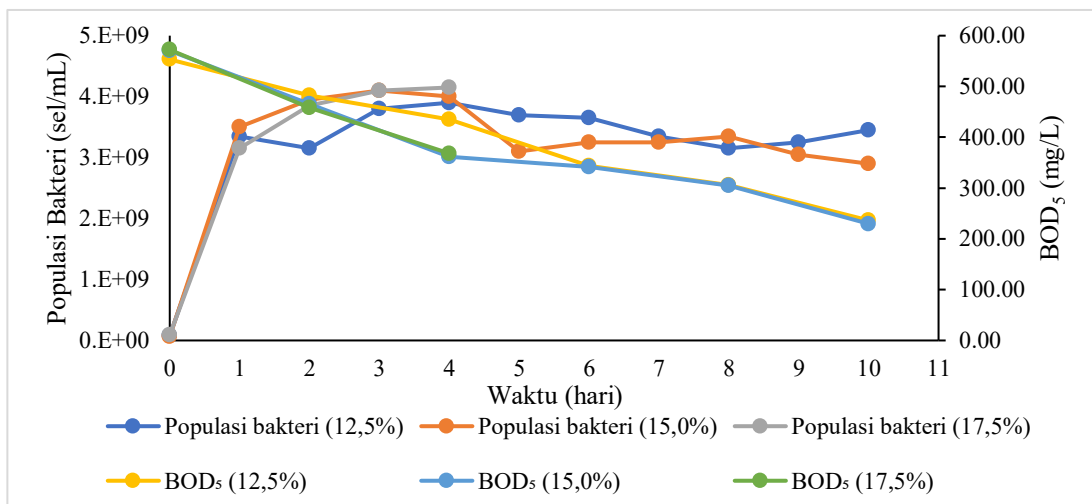
Berdasarkan gambar 4.10.(a), 4.10.(b), 4.10.(c) hasil power density bio-listrik maksimum sebesar 207,84 mW/m<sup>2</sup> dan ditunjukkan pada variasi konsentrasi bakteri sebesar 17,5% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda sebesar pH 3. Dari hasil ini dapat dikatakan bahwa konsentrasi awal bakteri yang paling baik dalam menghasilkan bio-listrik adalah 17,5%.

Dari gambar 4.11.(a), 4.11.(b), 4.11.(c) menunjukkan pada variasi pH 5 diruang katoda dengan konsentrasi bakteri sebesar 17,5% diruang anoda dan variasi pH 4 diruang katoda dengan konsentrasi bakteri sebesar 12,5% mengalami penurunan power density pada hari ke 5. Dikarenakan jembatan garam yang menghubungkan kedua ruang tersebut tersebut retak dan terpisah, yang berakibat aliran elektron berhenti.

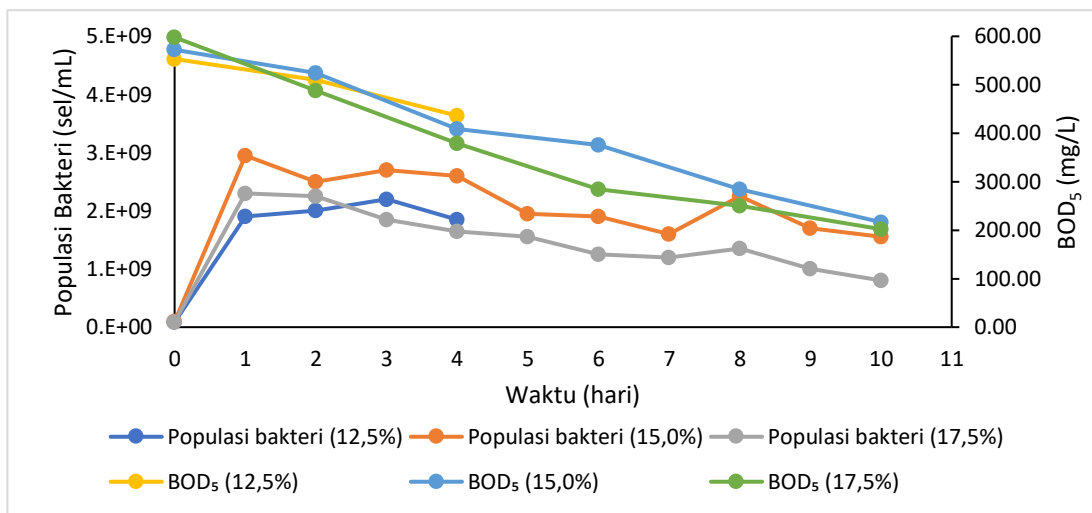
Peristiwa ini terjadi karena saat kedua ruang terpisahkan sama sekali tanpa adanya jembatan garam, maka aliran elektron akan segera berhenti. dan terjadi ketidak netralan listrik kedua elektroda, disatu bagian kelebihan muatan positif dan dibagian lain kelebihan muatan negatif. Dimana jembatan garam berfungsi sebagai penetralan muatan listrik di setiap elektroda melalui difusi ion.



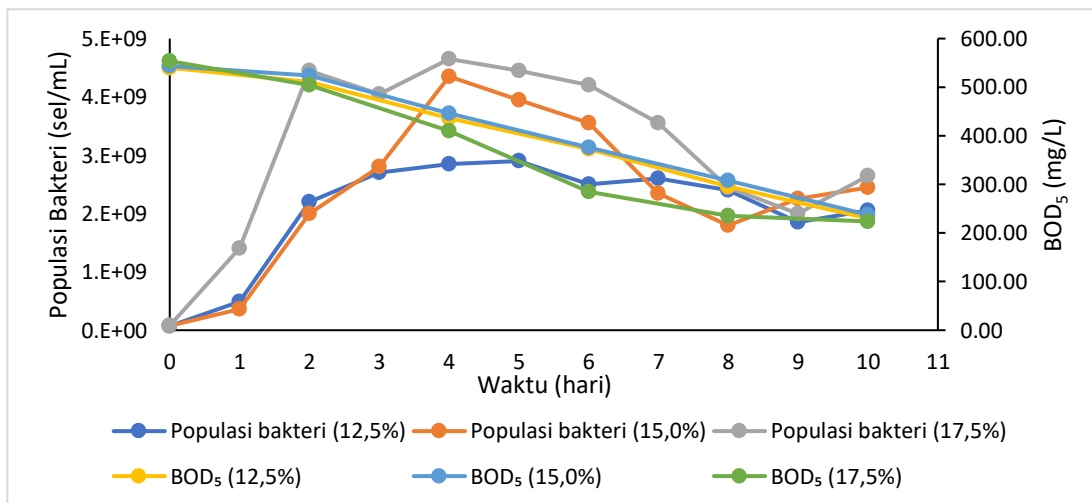
Gambar 4.10 Nilai *Power density* dengan variasi bakteri *Pseudomonas putida* dan variasi (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.11 Hubungan populasi bakteri dengan BOD<sub>5</sub> dengan waktu. Variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3

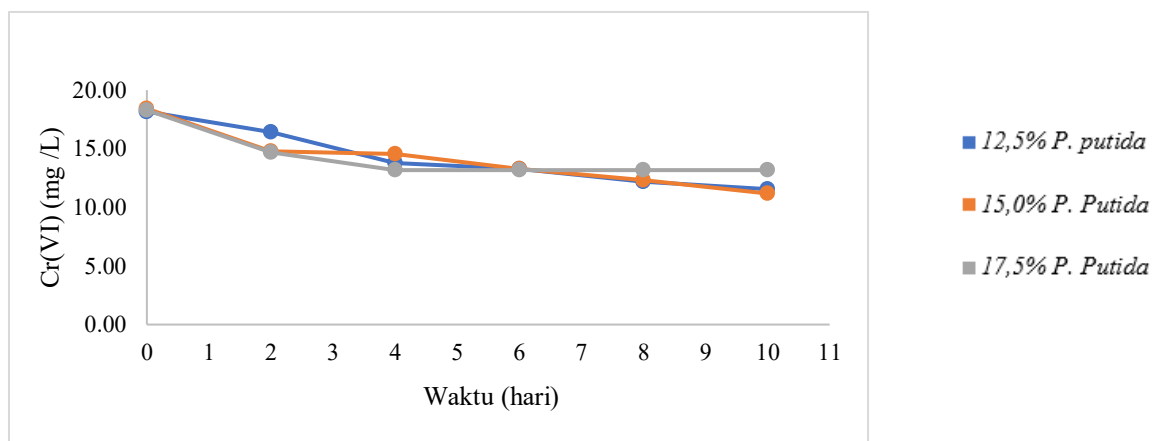
#### F. Reduksi logam Cr<sup>6+</sup> dengan bakteri *Pseudomonas putida* pada ruang anoda

Reaktor *microbial fuel cell* dikembangkan untuk menjadi pembangkit listrik dan pengolahan logam Cr(VI) secara bersamaan. Pada penelitian ini bertujuan untuk mereduksi logam Cr(VI) menjadi Cr(III) di ruang katoda dengan memanfaatkan proses metabolisme bakteri *Pseudomonas putida* yang terjadi di ruang anoda. Proses metabolisme dari bakteri ini menghasilkan proton (H<sup>+</sup>) dan elektron (e<sup>-</sup>) yang nantinya akan berpindah dari ruang anoda ke ruang katoda. Proton (H<sup>+</sup>) dan elektron (e<sup>-</sup>) yang berada pada ruang katoda akan bereaksi dengan ion logam Cr(VI) menghasilkan ion logam Cr(III), proses reaksi ini disebut reaksi reduksi.

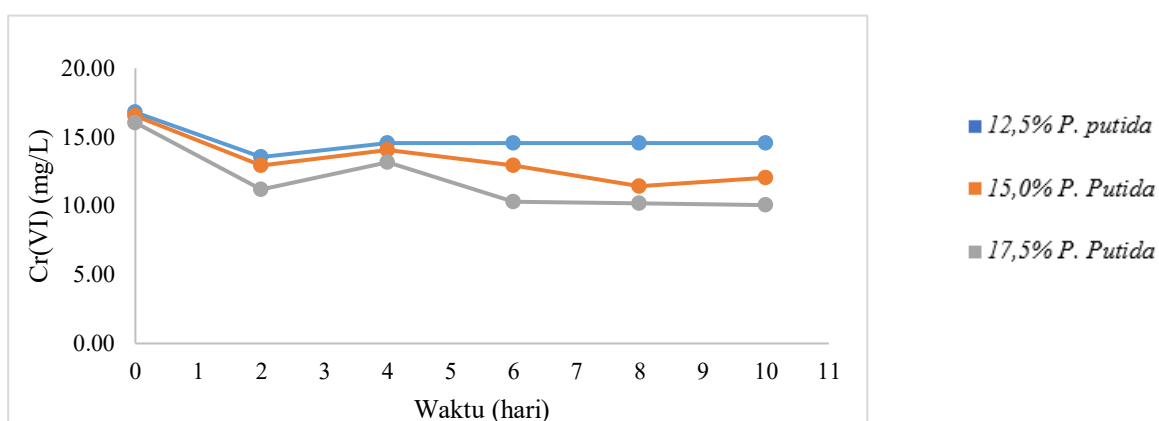
Gambar 4.13 menunjukkan penurunan kadar ion logam Cr(VI). Pada variasi pH 5 pada ruang katoda, penurunan konsentrasi ion logam Cr(VI) adalah 36,40%; 39,30%; 27,97% pada konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5%. Pada pH 4 pada ruang katoda, penurunan konsentrasi ion logam Cr(VI) adalah 19,32%; 21,87%; 30,33% pada konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5%. Dan kemudian pada pH 3 pada ruang katoda, penurunan konsentrasi ion logam Cr(VI) adalah 93,75%; 92,80%; 89,02% pada konsentrasi bakteri 12,5%; 15% dan 17,5%.

Pada gambar 4.12 dapat dikatakan bahwa saat kondisi pH 4 dan 5 konsentrasi ion logam Cr(VI) tidak mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini dikarenakan reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) tidak maksimal. Kemungkinan transfer proton (H<sup>+</sup>) dari anoda ke katoda tidak maksimal, karena mungkin proton (H<sup>+</sup>) yang terbentuk dari proses metabolisme bakteri akan bereaksi dengan oksigen (O<sub>2</sub>) dari proses aerasi membentuk senyawa dihidrogen oksida (H<sub>2</sub>O).

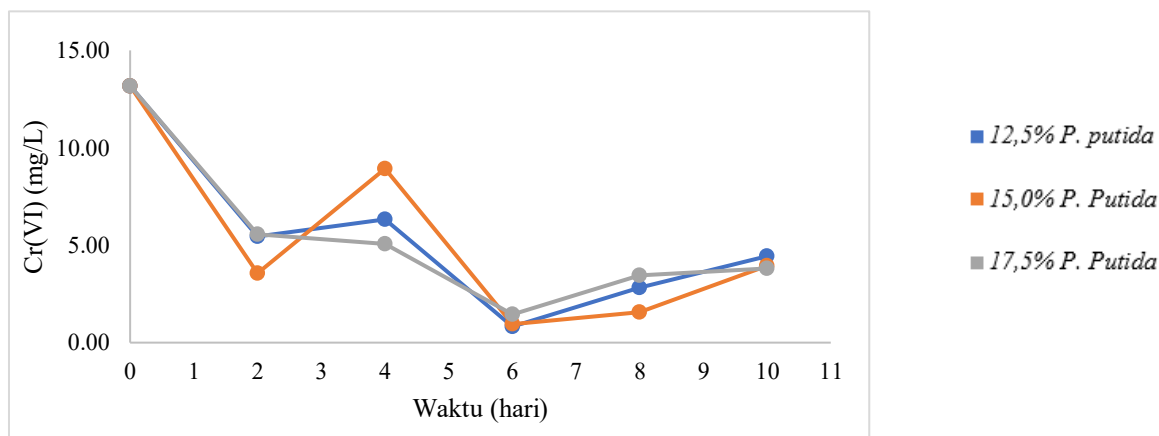
Tetapi pada saat kondisi pH 3, proses reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) cukup tinggi. Hal ini mungkin dikarenakan suasana pada ruang anoda cukup asam, yang berarti konsentrasi ion hidrogen (H<sup>+</sup>) dalam larutan cukup tinggi. Jadi walau transfer proton (H<sup>+</sup>) dari anoda ke katoda tidak maksimal, reaksi reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) cukup tinggi pada variabel pH 3 pada ruang katoda.



(a)

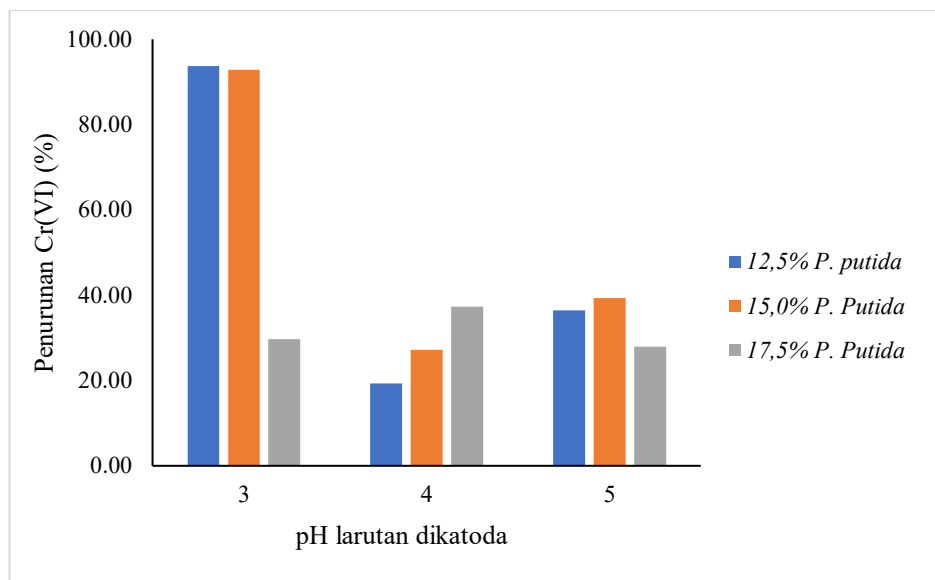


(b)



(c)

Gambar 4.12 Konsentrasi Cr(VI) sisa hasil reduksi pada reaktor MFC. Variasi pH di katoda (a) pH 5 (b) pH 4 (c) pH 3



Gambar 4.13 Grafik hubungan pH larutan dikatoda dengan persen penurunan Cr(VI)

#### G. Perbandingan Produksi Listrik dan Reduksi logam Cr<sup>6+</sup> dengan bakteri *Escherichia coli* dan *Pseudomonas putida* pada ruang katoda

Salah satu tujuan dari penelitian ini untuk meninjau bakteri yang paling berpengaruh untuk mereduksi logam Cr(VI) menjadi logam Cr(III) dengan menggunakan reaktor *microbial fuel cell*. Pada prinsipnya, *microbial fuel cell* dapat menghasilkan listrik karena memanfaatkan elektron dari proses metabolisme mikroba pada kondisi anaerob (tidak ada udara). Pada kondisi itulah bakteri mampu menguraikan glukosa, asetat, butirat, atau air limbah menjadi karbondioksida, proton (ion H<sup>+</sup>), dan elektron.

Bakteri yang digunakan dalam penelitian ini ada 2 jenis. Bakteri *Escherichia coli* merupakan jenis bakteri bersifat aerobik maupun anaerobik fakultatif (Breed dkk., 1957) dan *Pseudomonas putida* yang merupakan jenis bakteri aerobik obligat. Dari 2 jenis bakteri tersebut dalam memproduksi listrik yang paling maksimal adalah menggunakan bakteri *Pseudomonas putida* dengan variasi konsentrasi pH 3 pada ruang katoda dan konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* 17,5%. Sedangkan reduksi logam Cr(VI) yang paling maksimal adalah dengan menggunakan bakteri *Escherichia coli* dengan variasi konsentrasi pH 4 pada ruang katoda dan konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 15%.

## BAB V

### KESIMPULAN

#### A. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sementara bahwa:

1. Power density bio-listrik maksimum dari variasi bakteri *Escherichia coli* sebesar 20,41 mW/m<sup>2</sup> ditunjukkan pada variasi konsentrasi bakteri awal sebesar 15% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda pada pH 4 dan variasi bakteri *Pseudomonas putida* sebesar 207,84 mW/m<sup>2</sup> ditunjukkan pada variasi konsentrasi bakteri awal sebesar 17,5% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda pada pH 3.
2. Hasil reduksi Cr(VI) tertinggi dari variasi bakteri *Escherichia coli* sebesar 99,55% (konsentrasi awal Cr(VI) sebesar 16,79 mg/L menjadi 0,075 mg/L) ditunjukkan pada variasi konsentrasi bakteri awal sebesar 15% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda pada pH 4 dan dari variasi bakteri *Pseudomonas putida* sebesar 93,75% (konsentrasi awal Cr(VI) sebesar 13,18 mg/L menjadi 0,82 mg/L) ditunjukkan pada variasi konsentrasi bakteri awal sebesar 12,5% pada anoda dan variasi pH larutan di katoda pada pH 3.
3. Penurunan beban COD di katoda sebesar 29 - 50% dan penurunan beban BOD<sub>5</sub> di anoda sebesar 85 - 95% dari variasi bakteri *Escherichia coli* dan dari variasi bakteri *Pseudomonas putida* Penurunan beban COD di katoda sebesar 20 - 50% dan penurunan beban BOD<sub>5</sub> di anoda sebesar 20 - 70%.
4. Dari 2 jenis bakteri yang digunakan dalam memproduksi listrik yang paling maksimal adalah menggunakan bakteri *Pseudomonas putida* sedangkan reduksi logam Cr(VI) yang paling maksimal adalah dengan menggunakan bakteri *Escherichia coli*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Agung, A. Imam, 2013, *Potensi Sumber Energi Alternatif Dalam Mendukung Kelistrikan Nasional*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Unesa; Surabaya
- Chang et al, 2006, *Continuous Determination Of Biochemical Oxygen Demand Using Microbial Fuel Cell Type Biosensor*, Biosensors and Bioelectronics 19 (2004) 607–613
- Chang, Raymond, 2010, *Chemistry Edisi 10*, Publisher: McGraw-Hill
- Debabov, V. G., 2008, *Electricity from Microorganisms*, ISSN 0026-2617, Microbiology, Vol. 77, No. 2, pp. 123–131.
- Du, Zhuwei, H. Li, And T. Gu, 2007, *A State Of The Art Review On Microbial Fuel Cell; A Promising Technology For Wastewater Treatment And Bioenergy*. Journal Biotechnology Advances 25. 464-482
- Dwidjoseputro, D, 1998, *Dasar-Dasar Mikrobiologi*, Djambatan; Jakarta.
- Fitrialdi, 2011, *Microbial Fuel Cell Sebagai Energi Alternatif Menggunakan Bakteri Escherichia Coli*, Program Studi Kimia Pascasarjana Universitas Andalas ;Padang
- Gani, A. 2003, *Metode Diagnostik Bakteriologi III*, Balai Laboratorium Kesehatan; Makassar
- Harwood, C.S., Fosnaugh, K., and Dispensa, M., 1989, *Flagellation of Pseudomonas putida and analysis of its motile behavior*. J. Bacteriol., 171:4063-4066
- Hendrata Suhada, 2001, *Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Abad 21*, Jurnal Teknik Mesin Vol. 3, No. 2, Oktober 2001: 92 – 100
- Idham F., Halimi S, dan Latifah S., 2009, *Alternatif Baru Sumber Pembangkit Listrik dengan Menggunakan Sedimen Laut Tropika Melalui Teknologi Microbial Fuel Cell*, Teknologi Hasil Perairan Institut Pertanian Bogor.
- Imam Kholiq, 2015, *Pemanfaatan Energi Alternatif Sebagai Energi Terbarukan Untuk Mendukung Substitusi Bbm*, Jurnal Iptek Issn: 1411-7010 E-Issn: 2477-507x Vol.19 No. 2
- Ishibashi, Y., 1990, *Chromium reduction in Pseudomonas putida*, Applied and Environmental Microbiology J., 2268-2270.
- Fikri, M., 2011, *Microbial Fuel Cell, Energi Alterntif dari Bakteri*, ITB News

- Karthikeyan, 2016, *Effect of composites based nickel foam anode in microbial fuel cell using Acetobacter aceti and Gluconobacter roseus as a biocatalysts*, J. Bioresource Technology, Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/biortech](http://www.elsevier.com/locate/biortech)
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012, *Potensi Penghematan Energi Hingga 25 Persen*, <http://www.esdm.go.id/berita/323-energi-baru-dan-terbarukan/5989-potensi-penghematan-energi-hingga-25-persen.html>, diakses 10 Agustus 2016
- Khairani, Nina, dkk, 2007, *Penentuan Kandungan Unsur Krom Dalam Limbah Tekstil Dengan Metode Analisis Pengaktifan Neutron*, ISSN : 1410 – 9662 Vol 10. , No.1, Januari 2007, hal 35-43
- Kim, MH, 2009, *An Analysis of Anaerobic Dual-Anode Chambered Microbial Fuel Cell Performance*, Master's Thesis, University of Tennessee
- Lestari, sri, 1986, *Dasar-Dasar Mikrobiologi*, Jakarta; UI
- Liu H dan Logan BE, 2004, *Electricity Generation Using An Air Cathode Single-Chamber Microbial Fuel Cell In The Presence and Absence of Proton Exchange Membrane*, J. Environmental Science Technology 38: 4040
- Lovley, Derek R., 2006, *Microbial Fuel Cells: Novel Microbial Physiologies And Engineering Approaches*, Current Opinion in Biotechnology, 17:327–332
- Lovley Derek R, 2006, *Review Bug Juice : Harvesting Electricity With Microorganism*, Nature Reviews Microbiology Vol. 4 : 497 - 508
- Nahadi, Hernani, Fitri Khoirunnisa, 2005, *Biodegradasi Sifat Toksik Logam Berat Krom Dalam Limbah Cair Industri*, Jurnal Pengajaran MIPA, Vol. 6 No. 2 Desember, Issn: 1412-0917
- Nanchaiah, Y.V., Mohan, S.V. Lens, P.N.L, 2015, *Metal removal and recovery in bioelectrochemical system*, A review. Bioresour. Technol. 195, 96-101
- Novitasari, Deni, 2011, *Optimasi Kinerja Microbial Fuel Cell Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri Lactobacillus bulgaricus*, Skripsi, Fakultas Teknik Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia
- Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, Verhaege M, dan Verstraete W. 2004. *Biofuel cell select for microbial consortia that self-mediate electron transfer*. J. Applied Environmental Microbiology 70: 5373-5382.
- Ramani, K.V., 1992, *Rural Electrification And Rural Development*, Rural Electrification Guide Book For Asia & Pacific, Bangkok.

- Rozendal, R. A., Hamelers, H. V. M. & Buisman, C. J. N. 2006. *Effects of Membrane Cation Transport on pH and Microbial Fuel Cell Performance*. Journal Environmental Science Technology, Vol. 40, No.17, 5206–5211.
- Shen, and Wang, Y., 1993, *Characterization of Enzymatic Reduction of Hexavalent chromium by E. Coli*, Applied Environmental Microbiology Nov., 3771-3777.
- Shopia, A. Carmalin, Saikanth Sai, 2016, *Modified Microbial Fuel Cell For Cr(VI) reduction and simultaneous bio-electricity production*, Journal of Enviromental Chemical Engineering 4 (2402 – 2409)
- Silva, B., Figueiredo, H., Neves, I.C and Tavares, T., 2009, *The Role of pH on Cr(VI) Reduction and Removal by Arthrobacter Viscosus*, International Journal of Chemical and Biological Engineering 2:2 : 100-103.
- Purwati, Endang, dkk., 2014, *Inovasi Sumber Energi Terbarukan Dari Perancangan Prototipe Microbial Fuel Cell Tipe Seri, Paralel Dan Seri Paralel Dengan Memanfaatkan Bakteri Escherichia Coli*, Vol. 40 No. 1: 132 -141
- Tasri, Adek, Susilawati, Anita, 2014, *Selection Among Renewable Energy Alternatives Based On A Fuzzy Analytic Hierarchy Process In Indonesia*, Sustainable Energy Technologies And Assessments 7 (2014) 34–44, Journal Homepage: [www.Elsevier.Com/Locate/Seta](http://www.Elsevier.Com/Locate/Seta)
- Zahara, Nova Chisilia, 2011, *Pemanfaatan Saccharomyces cerevisiae Dalam Sistem Microbial Fuel Cell untuk Produksi Energi Listrik*, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Zhang, G.D., Jiao, Y., Lee, D.J. 2015. *A lab-scale anoxic/oxic-bioelectrochemical reactor for leachate treatments*. Bioresour.Technol. 186, 97\_105.

## APPENDIKS

1. Pembuatan larutan Cr (VI) dengan konsentrasi 10 mg/L dari padatan  $K_2Cr_2O_7$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa } K_2Cr_2O_7 \text{ yang dibutuhkan} &= \frac{Mr K_2Cr_2O_7}{Ar Cr} \times \text{Massa Cr} \\
 &= \frac{293,98 \text{ gram/mol}}{51,9 \text{ gram/mol}} \times 10 \text{ mgram} \\
 &= 56.64 \text{ mgram}
 \end{aligned}$$

Karena terdapat 2 atom dalam senyawa  $K_2Cr_2O_7$  maka, massa  $K_2Cr_2O_7$  yang dibutuhkan :  $56.64 \text{ mgram} : 2 = 28.32 \text{ mgram}$

2. Perhitungan *power density*

Tabel A.1 Nilai *power density* pada berbagai konsentrasi bakteri *Escherichia coli* dengan variasi pH 5 pada ruang katoda

Konsentrasi bakteri (%)	12,5			15,0			17,5		
Hari	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,100	0,001	0,085	0,200	0,003	0,510	0,100	0,001	0,085
2	0,200	0,001	0,170	0,400	0,004	1,361	0,100	0,001	0,085
3	0,200	0,001	0,170	0,400	0,004	1,361	0,100	0,001	0,085
4	0,200	0,002	0,340	0,200	0,002	0,340	0,200	0,001	0,170
5	0,200	0,002	0,340	0,300	0,002	0,510	0,200	0,001	0,170
6	0,200	0,002	0,340	0,300	0,003	0,765	0,100	0,001	0,085
7	0,100	0,001	0,085	0,100	0,001	0,085	0,200	0,001	0,170
8	0,100	0,001	0,085	0,100	0,001	0,085	0,200	0,001	0,170
9	0,100	0,001	0,085	0,100	0,001	0,085	0,300	0,003	0,765
10	0,200	0,001	0,170	0,100	0,001	0,085	0,300	0,003	0,765

Tabel A.2 Nilai *power density* pada berbagai konsentrasi bakteri *Escherichia coli* dengan variasi pH 4 pada ruang katoda

Konsentrasi bakteri (%)	12,5			15,0			17,5		
Hari	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )
0	0,100	0,001	0,085	0,100	0,001	0,085	0,200	0,002	0,340
1	0,800	0,006	4,082	1,300	0,010	11,055	0,400	0,004	1,361
2	0,700	0,005	2,976	0,800	0,006	4,082	0,300	0,003	0,765
3	1,000	0,008	6,803	1,500	0,016	20,409	0,800	0,007	4,762
4	0,700	0,007	4,167	0,700	0,006	3,572	0,700	0,004	2,381
5	0,800	0,007	4,762	1,300	0,010	11,055	0,900	0,008	6,123
6	0,900	0,008	6,123	0,600	0,006	3,061	1,000	0,008	6,803
7	1,000	0,008	6,803	0,600	0,005	2,551	0,800	0,005	3,402
8	0,600	0,005	2,551	0,400	0,004	1,361	0,300	0,002	0,510
9	0,300	0,003	0,765	0,300	0,003	0,765	0,300	0,003	0,765
10	0,500	0,004	1,701	0,300	0,002	0,510	0,300	0,002	0,510

Tabel A.3 Nilai *power density* pada berbagai konsentrasi bakteri *Escherichia coli* dengan variasi pH 3 pada ruang katoda

Konsentrasi bakteri (%)	12,5			15,0			17,5		
Hari	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )
0	1,100	0,010	9,354	0,300	0,003	0,765	0,600	0,004	2,041
1	1,300	0,010	11,055	0,400	0,004	1,361	0,300	0,002	0,510
2	0,600	0,004	2,041	0,200	0,002	0,340	0,300	0,002	0,510
3	0,800	0,006	4,082	0,200	0,002	0,340	0,300	0,002	0,510
4	0,500	0,004	1,701	0,300	0,003	0,765	0,400	0,003	1,020
5	0,400	0,004	1,361	0,200	0,001	0,170	0,300	0,002	0,510
6	0,300	0,003	0,765	0,300	0,003	0,765	0,400	0,003	1,020
7	0,500	0,005	2,126	0,200	0,001	0,170	0,300	0,003	0,765

8	0,400	0,003	1,020	0,100	0,001	0,085	0,300	0,002	0,510
9	0,200	0,002	0,340	0,100	0,001	0,085	0,200	0,001	0,170
10	1,100	0,010	9,354	0,300	0,003	0,765	0,600	0,004	2,041

Tabel A.4 Nilai *power density* pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dengan variasi pH 5 pada ruang katoda

Konsentrasi bakteri (%)	12,5			15,0			17,5		
Hari	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )
0	0.3	0.002	0.51	0.1	0.001	0.09	0.3	0.002	0.51
1	0.3	0.003	0.77	0.1	0.001	0.09	0.3	0.003	0.77
2	0.2	0.002	0.34	0.4	0.003	1.02	0.5	0.005	2.13
3	1.6	0.015	20.41	1.4	0.013	15.48	1.2	0.011	11.23
4	1.3	0.012	13.27	1.4	0.012	14.29	1.2	0.011	11.23
5	0.4	0.004	1.36	0.9	0.009	6.89	0.0	0.000	0.00
6	0.6	0.005	2.55	1.0	0.008	6.80	0.0	0.000	0.00
7	0.8	0.007	4.76	0.7	0.007	4.17	0.0	0.000	0.00
8	0.7	0.007	4.17	0.8	0.008	5.44	0.0	0.000	0.00
9	0.8	0.007	4.76	0.6	0.005	2.55	0.0	0.000	0.00
10	1.0	0.010	8.50	0.6	0.005	2.55	0.0	0.000	0.00

Tabel A.5 Nilai *power density* pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dengan variasi pH 4 pada ruang katoda

Konsentrasi bakteri (%)	12,5			15,0			17,5		
Hari	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )
0	0.4	0.003	1.02	0.2	0.002	0.34	0.4	0.004	1.36
1	0.8	0.008	5.44	0.5	0.005	2.13	0.8	0.007	4.76
2	1.9	0.017	27.47	0.7	0.005	2.98	0.8	0.006	4.08
3	1.9	0.017	27.47	0.5	0.005	2.13	0.5	0.004	1.70
4	0.3	0.003	0.77	0.4	0.004	1.36	0.6	0.005	2.55
5	0.0	0.000	0.00	0.7	0.005	2.98	1.4	0.013	15.48
6	0.0	0.000	0.00	1.5	0.013	16.58	0.9	0.007	5.36
7	0.0	0.000	0.00	1.9	0.016	25.85	0.8	0.006	4.08
8	0.0	0.000	0.00	2.1	0.019	33.93	1.9	0.017	27.47
9	0.0	0.000	0.00	1.8	0.019	29.08	1.4	0.013	15.48
10	0.0	0.000	0.00	2.1	0.019	33.93	1.4	0.012	14.29

Tabel A.6 Nilai *power density* pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dengan variasi pH 3 pada ruang katoda

Konsentrasi bakteri (%)	12,5			15,0			17,5		
Hari	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )	V (volt)	I (mA)	P (mW/m <sup>2</sup> )
0	0.1	0.001	0.09	0.2	0.001	0.17	0.4	0.005	1.70
1	0.1	0.001	0.09	0.3	0.002	0.51	0.6	0.006	3.06
2	2.1	0.020	35.72	1.5	0.014	17.86	3.0	0.028	71.43
3	2.2	0.020	37.42	1.6	0.014	19.05	3.6	0.032	97.97
4	2.2	0.020	37.42	2.3	0.020	39.12	4.5	0.039	149.24
5	3.5	0.029	86.31	2.6	0.024	53.06	4.9	0.044	183.34
6	4.3	0.039	142.61	2.7	0.025	57.40	5.0	0.047	199.84

7	4.2	0.037	132.15	3.1	0.027	71.18	4.8	0.043	175.52
8	3.2	0.030	81.64	4.2	0.038	135.72	5.2	0.047	207.84
9	1.1	0.007	6.55	2.0	0.012	20.41	2.4	0.020	40.82
10	0.1	0.001	0.09	0.2	0.001	0.17	0.4	0.005	1.70

Perhitungan luas penampang elektroda grafit:

$$\begin{aligned}
 \text{Luas penampang } (A) &= (2\pi r^2) + (2\pi rh) \\
 &= (2 \times 3,14 \times (0,35 \text{ cm})^2) + (2 \times 3,14 \times 0,35 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}) \\
 &= 0,7693 \text{ cm}^2 + 10,99 \text{ cm}^2 \\
 &= 11,7 \text{ cm}^2 \\
 &= 1,17 \times 10^{-3} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Dimana r sebagai jari-jari dari elektroda grafit dan h sebagai tinggi dari elektroda grafit

Perhitungan nilai *power density*:

$$\begin{aligned}
 \text{Power density } \left( \frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \right) &= \frac{I (\text{mA}) \times V (\text{Volt})}{A (\text{m}^2)} \\
 &= \frac{0,001 \text{ mA} \times 0,1 \text{ volt}}{1,17 \times 10^{-3} \text{ m}^2} \\
 &= 0,085 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}
 \end{aligned}$$



3. Data Pertumbuhan Bakteri *Escherichia coli* dan *Pseudomonas putida*

Tabel A.7 Data pertumbuhan bakteri *Escherichia coli* pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 5 pada ruang katoda

Hari	Konsentrasi bakteri (%)		
	12,5	15,0	17,5
	(sel/mL)		
0	$2 \times 10^8$	$2 \times 10^8$	$3 \times 10^8$
1	$3 \times 10^8$	$4 \times 10^8$	$4 \times 10^8$
2	$4 \times 10^8$	$6 \times 10^8$	$4 \times 10^8$
3	$5 \times 10^8$	$6 \times 10^8$	$3 \times 10^8$
4	$7 \times 10^8$	$6 \times 10^8$	$4 \times 10^8$
5	$8 \times 10^8$	$8 \times 10^8$	$4 \times 10^8$
6	$7 \times 10^8$	$1 \times 10^8$	$3 \times 10^8$
7	$5 \times 10^8$	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^8$
8	$7 \times 10^8$	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^8$
9	$7 \times 10^8$	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^8$
10	$7 \times 10^8$	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^8$

Tabel A.8 Data pertumbuhan bakteri *Escherichia coli* pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 4 pada ruang katoda

Hari	Konsentrasi bakteri (%)		
	12,5	15,0	17,5
	(sel/mL)		
0	$1 \times 10^7$	$5 \times 10^7$	$6 \times 10^7$
1	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
2	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
3	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
4	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
5	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
6	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
7	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
8	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
9	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
10	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$

Tabel A.9 Data pertumbuhan bakteri *Escherichia coli* pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 3 pada ruang katoda

Hari	Konsentrasi bakteri (%)		
	12,5	15,0	17,5
	(sel/mL)		
0	$3 \times 10^8$	$3 \times 10^8$	$4 \times 10^8$
1	$7 \times 10^8$	$9 \times 10^8$	$1 \times 10^9$
2	$7 \times 10^8$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^9$
3	$1 \times 10^9$	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
4	$1 \times 10^9$	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
5	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
6	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
7	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
8	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
9	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
10	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$

Tabel A.10 Data pertumbuhan bakteri *Pseudomonas putida* pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 5 pada ruang katoda

Hari	Konsentrasi bakteri (%)		
	12,5	15,0	17,5
	(sel/mL)		
0	$8 \times 10^7$	$7 \times 10^7$	$9 \times 10^7$
1	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
2	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
3	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
4	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
5	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	
6	$4 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	
7	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	
8	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	
9	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	
10	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	

Tabel A.11 Data pertumbuhan bakteri *Pseudomonas putida* pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 4 pada ruang katoda

Hari	Konsentrasi bakteri (%)		
	12,5	15,0	17,5
	(sel/mL)		
0	$9 \times 10^7$	$1 \times 10^8$	$9 \times 10^7$
1	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
2	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
3	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
4	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
5		$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
6		$2 \times 10^9$	$1 \times 10^9$
7		$2 \times 10^9$	$1 \times 10^9$
8		$2 \times 10^9$	$1 \times 10^9$
9		$2 \times 10^9$	$1 \times 10^9$
10		$2 \times 10^9$	$8 \times 10^8$

Tabel A.12 Data pertumbuhan bakteri *Pseudomonas putida* pada berbagai konsentrasi bakteri dengan variasi pH 3 pada ruang katoda

Hari	Konsentrasi bakteri (%)		
	12,5	15,0	17,5
	(sel/mL)		
0	$7 \times 10^7$	$8 \times 10^7$	$8 \times 10^7$
1	$5 \times 10^8$	$4 \times 10^8$	$1 \times 10^9$
2	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
3	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
4	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$5 \times 10^9$
5	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
6	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
7	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
8	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
9	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$
10	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^9$	$3 \times 10^9$

Perhitungan populasi bakteri

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah sel/mL} &= \text{rata - rata jumlah sel} \times 2,5 \times 10^6 \times \text{faktor pengenceran} \\
 &= 6,6 \times 2,5 \times 10^6 \times 10^1 \\
 &= 165.000.000 \text{ sel/mL}
 \end{aligned}$$

#### 4. Perhitungan BOD<sub>5</sub>

Tabel A.13 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 12,5% dengan variasi pH 5 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	2,05	2,94	7,83	139,610
2	1,76	2,37	5,92	100,450
4	1,27	3,61	5,17	95,940
6	2,02	2,18	4,68	64,000
8	2,77	2,3	3,73	22,570
10	2,88	2,12	3,42	12,200

Tabel A.14 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 15% dengan variasi pH 5 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	2,12	2,79	7,83	137,710
2	1,4	2,6	5,92	109,680
4	1,11	3,70	5,17	100,030
6	2,39	2,17	4,68	54,740
8	2,65	2,23	3,73	25,500
10	3,03	1,6	3,42	7,930

Tabel A.15 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 17,5% dengan variasi pH 5 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	2,11	2,84	7,83	138,010
2	1,25	2,36	5,92	113,190
4	1,13	3,86	5,17	99,690
6	1,94	2,14	4,68	65,960
8	2,19	1,9	3,73	36,670
10	3,08	1,41	3,42	6,490

Tabel A.16 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 12,5% dengan variasi pH 4 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	0,83	1,33	5,92	122,66
2	4,17	3,30	7,49	78,81
4	3,37	5,61	5,63	56,48
6	6,64	2,14	7,59	18,30
8	7,00	2,57	7,92	17,65
10	2,30	0,94	2,63	6,56

Tabel A.17 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 15% dengan variasi pH 4 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	0,84	1,72	5,92	122,80
2	3,99	2,32	7,49	82,33
4	3,36	5,56	5,63	56,68
6	6,55	2,24	7,59	20,65
8	7,22	2,43	7,92	12,01
10	2,04	0,94	2,63	13,06

Tabel A.18 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 17,5% dengan variasi pH 4 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	0,86	1,62	5,92	122,20
2	3,02	2,56	7,49	106,82
4	3,36	5,57	5,63	56,69
6	5,94	2,18	7,59	35,84
8	6,56	2,59	7,92	28,67
10	2,29	0,94	2,63	6,81

Tabel A.19 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 12,5% dengan variasi pH 3 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	0,83	1,34	6,63	139,710
2	1,29	2,08	5,59	103,990
4	1,45	1,07	4,53	73,540
6	2,34	1,67	3,63	30,290
8	2,45	1,84	2,98	12,110
10	1,33	2,1	2,13	19,970

Tabel A.20 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 15% dengan variasi pH 3 pada ruang katoda.

Hari	DOs <sup>0</sup>	DOs <sup>5</sup>	DO <sub>r</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	0,84	0,91	6,63	139,030
2	1,35	1,97	5,59	102,380
4	1,33	1,10	4,53	76,570
6	1,49	1,70	3,63	51,570
8	2,02	1,86	2,98	22,880
10	1,28	2,04	2,13	21,160

Tabel A.21 Nilai BOD<sub>5</sub> pada konsentrasi bakteri *Escherichia coli* 17,5% dengan variasi pH 3 pada ruang katoda.

Hari	DO <sub>s</sub> <sup>0</sup>	DO <sub>s</sub> <sup>5</sup>	DO <sub>f</sub> <sup>5</sup>	BOD <sub>5</sub>
	(mg/L)			
0	0,89	0,54	6,63	137,410
2	1,37	2,07	5,59	101,980
4	1,88	1,27	4,53	62,990
6	1,89	1,74	3,63	41,610
8	1,85	1,84	2,98	27,110
10	1,67	1,99	2,13	11,360

Tabel A.22 Nilai BOD<sub>5</sub> pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dan berbagai variasi pH pada ruang katoda

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
Konsentrasi bakteri (%)	(mg/L)								
0	553.25	570.37	572.26	553.25	572.26	597.99	539.87	543.35	553.59
2	482.14	465.50	458.37	510.39	523.82	488.19	510.39	523.82	504.22
4	435.24	361.50	368.21	436.24	408.44	378.98	436.24	445.66	410.24
6	343.50	341.69			375.50	284.24	372.36	375.50	284.24
8	305.66	304.58			284.16	250.44	295.86	308.06	234.86
10	236.38	229.71			216.56	202.17	230.15	237.51	223.77

Perhitungan nilai BOD<sub>5</sub> dalam substrat

$$\begin{aligned}
 \text{nilai BOD}_5 &= \text{DO}_s^5 - \text{DO}_f + \left[ \frac{\text{Volume}}{\text{Volume sampel}} \times (\text{DO}_f - \text{DO}_s^0) \right] \\
 &= 2,94 - 7,83 + \left[ \frac{250}{10} \times (7,83 - 2,05) \right] \\
 &= 139,61 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

## 5. Data nilai COD pada ruang katoda

Tabel A.23 Nilai COD pada berbagai konsentrasi bakteri *Escherichia coli* dan berbagai variasi pH pada ruang katoda.

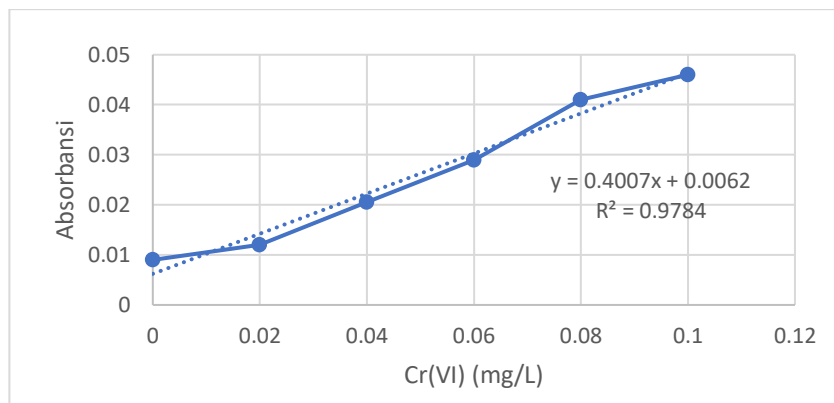
Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
	(mg/L)								
0	738,37	736,60	683,98	615,36	617,61	615,68	348,76	386,61	338,56
2	696,86	526,14	462,09	496,41	578,76	649,68	343,14	356,16	331,69
4	688,56	496,40	459,80	489,54	510,13	409,48	317,97	347,71	272,22
6	629,08	482,68	446,08	466,67	500,98	375,16	276,79	297,39	272,22
8	523,85	434,64	411,76	363,73	484,97	345,43	274,51	274,51	267,65
10	491,83	382,02	379,74	359,15	439,22	311,11	194,44	263,07	228,76

Tabel A.24 Nilai COD pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dan berbagai variasi pH pada ruang katoda.

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
	(mg/L)								
0	597.39	592.81	583.98	663.40	660.61	655.68	372.87	345.42	395.75
2	567.65	567.86	563.63	562.25	548.56	555.88	348.76	386.61	338.56
4	547.05	551.63	541.47	489.54	510.13	409.48	317.97	347.71	372.22
6	453.92	466.67			462.58	402.61	334.64	354.57	323.20
8	458.50	456.86			424.57	387.65	322.87	345.42	305.75
10	431.67	415.69			333.33	352.29	281.37	265.22	258.65



## 6. Data reduksi ion logam Cr(VI)



Gambar A.1. Kurva kalibrasi logam Cr(VI)

Perhitungan nilai konsentrasi ion Cr(VI):

$$\begin{aligned}
 y &= bx + a \\
 x &= \frac{y - a}{b} \\
 &= \frac{0,077 - 0,0062}{0,4007} \\
 &= 0,1767 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

Karena dilakukan pengenceran 100 kali maka nilai konsentrasi ion Cr(VI):

$$\begin{aligned}
 &= 0,1767 \text{ mg/L} \times 10^2 \\
 &= 17,67 \text{ mg/L}
 \end{aligned}$$

Tabel A.25 Hasil reduksi ion Cr(VI) pada berbagai konsentrasi bakteri *Escherichia coli* dan berbagai variasi pH pada ruang katoda.

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
	(mg/L)								
0	17,67	18,79	17,92	16,55	16,80	16,17	16,17	15,67	15,55
2	11,80	14,05	12,43	4,52	10,81	8,19	1,07	1,07	2,94
4	7,94	10,18	10,93	0,45	4,19	7,31	0,70	0,70	1,07
6	6,94	10,06	5,07	0,95	0,57	2,07	0,82	1,82	1,57
8	5,57	7,81	4,82	0,45	0,45	0,45	1,70	1,70	2,70
10	2,45	6,31	3,32	0,32	0,07	0,20	2,82	1,57	2,07

Tabel A.26 Hasil reduksi ion Cr(VI) pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dan berbagai variasi pH pada ruang katoda.

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
	(mg/L)								
0	18.17	18.42	18.29	16.80	16.55	16.05	13.18	13.18	13.18
2	16.42	14.80	14.67	13.55	12.93	11.18	5.44	3.57	5.57
4	13.80	14.55	13.18	14.55	14.05	13.18	6.31	8.93	5.07
6	13.30	13.30	13.18	14.55	12.93	10.31	0.82	0.95	1.45
8	12.18	12.30	13.18	14.55	11.43	10.18	2.82	1.57	3.44
10	11.55	11.18	13.18	14.55	12.05	10.06	4.44	3.94	3.82

#### 7. Data pH pada ruang anoda dan katoda

Tabel A.27 Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri *Escherichia coli* dan berbagai variasi pH pada ruang anoda.

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
0	7,1	7,1	7,1	8,6	8,7	8,6	7,2	7,3	7,3
1	7,1	7,1	7,1	7,7	7,9	7,8	7,1	7,1	7,1
2	7,1	7,2	7,0	7,7	7,6	7,6	7,1	7,1	7,2
3	7,1	7,2	7,0	7,8	7,8	7,9	7,2	7,2	7,2
4	7,2	7,2	7,1	7,9	7,8	7,8	7,2	7,2	7,2
5	7,3	7,3	7,3	7,8	7,9	7,7	7,2	7,2	7,2
6	7,3	7,3	7,2	7,8	7,8	7,8	7,2	7,2	7,3
7	7,3	7,3	7,2	8,0	7,9	7,9	7,2	7,2	7,2
8	7,4	7,4	7,3	7,8	7,7	7,8	7,3	7,3	7,3
9	7,4	7,4	7,3	8,0	7,9	7,9	7,3	7,3	7,3
10	7,5	7,5	7,4	8,0	7,8	7,8	7,3	7,3	7,3

Tabel A.28 Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dan berbagai variasi pH pada ruang anoda.

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
0	7.2	7.3	7.3	7.6	7.3	7.5	7.0	7.0	7.0
1	8.1	7.8	7.8	7.9	7.8	7.9	7.2	7.3	7.2
2	8.0	7.7	7.7	7.9	7.8	7.8	7.2	7.3	7.2
3	8.2	8.0	7.9	8.0	7.9	7.9	7.3	7.4	7.2
4	8.0	7.9	8.0	8.0	7.9	7.9	7.3	7.4	7.3
5	8.1	8.0			7.9	7.9	7.3	7.4	7.3
6	8.1	8.0			8.0	7.9	7.4	7.4	7.3
7	8.1	8.0			8.0	7.9	7.4	7.4	7.3
8	8.1	8.0			8.0	7.9	7.4	7.4	7.4
9	8.1	8.0			8.1	7.9	7.4	7.4	7.4
10	8.1	8.0			8.1	7.9	7.4	7.4	7.4

Tabel A.29 Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri *Escherichia coli* dan berbagai variasi pH pada ruang katoda.

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
0	5	5	5	4	4	4	3	3	3
1	5,2	5,1	5,2	3,9	3,9	3,9	3,1	3,1	3,1
2	5,3	5,2	5,2	3,8	3,8	3,8	3,1	3,1	3,1
3	5,4	5,3	5,3	4,1	4	4,1	3,1	3,1	3,1
4	5,4	5,3	5,3	4,3	4,1	4,1	3,1	3,1	3,1
5	5,4	5,3	5,3	4,4	4,3	4,2	3,2	3,1	3,1
6	5,5	5,3	5,3	4,2	4,3	4,2	3,2	3,1	3,1
7	5,7	5,4	5,4	4,3	4,3	4,3	3,2	3,2	3,2
8	5,8	5,4	5,5	4,3	4,3	4,3	3,2	3,2	3,2
9	5,9	5,5	5,5	4,5	4,4	4,3	3,2	3,2	3,2
10	6,2	5,4	5,6	4,9	4,6	4,4	3,2	3,2	3,1

Tabel A.30 Hasil pH pada berbagai konsentrasi bakteri *Pseudomonas putida* dan berbagai variasi pH pada ruang katoda.

Hari	pH 5			pH 4			pH 3		
Konsentrasi bakteri (%)	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%	12,5%	15,0%	17,5%
0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0
1	5.0	4.9	4.9	4.1	4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
2	5.0	5.0	5.0	4.3	4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
3	5.0	5.0	5.0	4.3	4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
4	5.1	5.0	5.0	4.4	4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
5	5.1	5.0			4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
6	5.1	5.1			4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
7	5.1	5.1			4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
8	5.1	5.2			4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
9	5.1	5.3			4.2	4.2	3.0	3.0	3.0
10	5.3	5.2			4.2	4.2	3.0	3.0	3.0

## BIODATA PENULIS



Penulis adalah putri pertama dari pasangan Bapak Priyadi dan Ibu Sutarti yang dilahirkan pada tanggal 07 September 1987 di Balikpapan (Kalimantan Timur). Penulis merupakan alumni dari TK Tunas Harapan 1 Balikpapan, SD Patra Dharma 1 Balikpapan, SMP Negeri 3 Balikpapan, SMA Negeri 2 Balikpapan dan menyelesaikan studi S1 Pendidikan Kimia pada tahun 2010 di Universitas Mulawarman Samarinda. Penulis melanjutkan studi S2 Teknik Kimia di Institut Teknologi Sepuluh Nopember sejak September 2015. Selama menempuh studi S2, penulis pernah mengikuti seminar internasional sebagai pembicara di *The 3rd International Conference on Science and Technology* (UGM Indonesia, July 2017). Penulis menyelesaikan Tesis yang berfokus pada bidang *Renewable Energy*, khususnya *microbial fuel cell* yang dimodifikasi untuk dapat mengolah logam berat (kromium). Penulis memiliki hobi membaca, menonton film serta traveling

Email : [ira.0709@gmail.com](mailto:ira.0709@gmail.com)/[ira\\_0709@yahoo.co.id](mailto:ira_0709@yahoo.co.id)